

Raimo Ruoppa • Jani Sipola • Juha Maronen

Ultralujien terästen särmättävyyden ja takaisinjouston määrittäminen konenäön avulla sekä taivutusvoimat

KuURaK -projektin särmäyskokeet



Ultralujien terästen särmättävyyden ja takaisinjouston määrittäminen
konenäön avulla sekä taivutusvoimat

Raimo Ruoppa • Jani Sipola • Juha Maronen

Ultralujien terästen särmättävyyden ja takaisinjouston määrittäminen konenäön avulla sekä taivutusvoimat

KuURaK -projektin särmäyskokeet

Sarja B. Raportit ja selvitykset 23/2013

© Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-5897-96-8 (nid.)

ISSN 1799-2834 (painettu)

ISBN 978-952-5897-97-5 (pdf)

ISSN 1799-831X (verkkajulkaisu)

ISSN-L 1799-2834

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Raportit ja julkaisut 23/2013

Rahoittajat: Euroopan Unioni Euroopan aluekehitysrahasto, Vipuvoimaa EU:lta 2007-2013, Tekes

Kirjoittaja: Raimo Ruoppa. Jani Sipola,
Juha Maronen

Kannen kuva: Raimo Ruoppa1

Taitto: Ella Käyhkö

Uniprint, Oulu 2011

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu
Tietokatu 1
94600 Kemi
Puh. 010 353 50

www.tokem.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni LUC on yliopiston ja kahden ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä. Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja Rovaniemen ammattikorkeakoulu.



www.luc.fi

Sisällys

ESIPUHE	9
1 JOHDANTO	11
2 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT	13
2.1 KOEMATERIAALIT	13
2.2 KOEMENETELMÄT	14
2.2.1 Särämäyspuristin ja työkalut	14
2.2.2 Taivutusvoimien mittaust	16
2.2.3 Takaisinjoustojen mittaust	16
2.2.4 Säröasteen määrittyst	17
2.2.5 Mutterimaisuus konenäöllä	19
2.2.6 Kovuusmittaukset ja mikrorakennetarkastelut	21
2.3 KOEMATRIISI JA KOKEIDEN SUORITUS	21
3 TULOKSET	23
3.1 TAIVUTUSVOIMAT	23
3.1.1 Maksimivoimat	23
3.1.2 Voimakäyrät	23
3.2 TAKAISINJOUSTOT	27
3.3 SÄRMÄN ULKOREUNAN TARKASTELUT	30
3.3.1 Mutterimaisuus	34
3.3.2 Silmämääräinen säröaste	38
3.3.3. Konenäköön perustuva säröaste	42
3.4 SÄRMÄN POIKKILEIKKAUKSEN TARKASTELUT	45
3.4.1 Kovuusmittaukset sekä paksuudet ja sisäsäteet	45
3.4.2 Mikrorakenteet	53
4 TULOSTEN TARKASTELU	57

4.1 TAIVUTUSVOIMAT	57
4.2 TAKAISINJOUSTOT	69
4.3 MINIMITAIVUTUSSÄTEIDEN ARVIOINTI.	70
4.4. SÄRÖASTEIDEN VERTAILU: SILMÄMÄÄRÄINEN VS. KONENÄKÖ . . .	72
4.5 SÄRÖASTEEN TUNNISTAMISEN PARANTAMINEN	74
4.6 NEUTRAALIAKSELIT JA K-ARVOT SEKÄ SÄRMÄN POIKKILEIKKAUSPROFIILIT	76
YHTEENVETO	79
KIRJALLISUUS.	81

TIIVISTELMÄ

Tässä raportissa on esitetty Tekesin rahoittamassa KuURaK-projektissa Kemi-Tornion ammattikorkeakoulussa Materiaalien Käytettävyyden Tutkimusryhmässä (MKT) ja Optisen Mittaustekniikan Laboratoriossa (OML) tehtyjen särmäystutkimusten tulokset. Tutkittavat teräkset olivat Ruukin ultralujia (UHSS) teräksiä Optim 700 MC Plus, Optim 700 QL, Optim 960 QC, Raex 400 ja Raex 500 paksuudeltaan 8 tai 10 mm. Koemateriaaleja särmättiin 90 asteen kulmaan käyttäen erilaisia painimen säteitä ja V-aukkojen mittoja. Särmäyksen aikana mitattiin taivutusvoima ja särmäystapahtuma kuvattiin takaisinjouston määrittämiseksi kehitetyllä konenäkösovelluksella. Särmätyistä näytteistä tarkasteltiin särmän laatua silmämääräisellä tarkastelulla sekä säröasteen määrittämiseen kehitetyllä konenäkösovelluksella ja vertailtiin tarkastusmenetelmiä keskenään. Särmiä poikkileikkauksesta määritettiin kovuusmittausten avulla neutraaliakselin paikka ja särmiä sisä-säteet sekä mikrorakennetta.

ABSTRACT

In this report, results of the bending tests carried out in Tekes funded KuURaK-project in Materials Usability Research Group (MUR) in Kemi-Tornio University of Applied Sciences, are presented. The steels researched were Ruukki's ultra-high-strength (UHSS) steels Optim 700 MC Plus, Optim 700 QL, Optim 960 QC, Raex 400 and Raex 500. The thicknesses of the steels were either 8 or 10 mm or both. The steels were studied using bending tests with various punch radii and diameters of the V-die. The test samples were bent to a 90-degree angle using a hydraulic press. During the tests, bending forces and spring backs were measured. Quality of the bend was inspected by visual inspection and machine vision system and compared each other. The maximum forces applied in the bending tests were compared with the forces predicted by known equations. After the tests, cross-sections of some bends were examined by means of hardness measurements and microscope in order to define the location of the neutral axis and microstructure.

AVAINSANAT

KuURaK, särmäys, ultraluja teräs, Raex, Optim
Apuna voi käyttää YSA – yleistä suomalaista asiasanastoa.

Esipuhe

Kirjoittajat työskentelevät Kemi-Tornion AMK:n Tekniikan TKI-yksikössä. Raimo Ruoppa on erikoisasiantuntijana Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmässä (MKT) ja erikoistunut ultralujien terästen särmättävyyden tutkimiseen. Jani Sipola ja Juha Maronen ovat projekti-insinööreinä Optisen mittaustekniikan laboratoriossa (OML).

1 Johdanto

Tekesin rahoittamassa KuURaK-projektissa (Tutkimus Kuumavalssattujen Ultralujien Rakenne- ja kulutusterästen Käytettävyydestä) tutkittiin kuumavalssattujen ultralujien rakenne- ja kulutusterästen käytettävyyttä. Teräksille mm. haettiin uusia käyttökohteita ja testattiin niiden käytettävyyttä käytännön olosuhteissa. Projektiin osallistui konepajoja, jotka testaavat projektissa tutkittavia teräksiä ja suunnittelutoimistoja, jotka saavat tietoa suunnittelussa huomioitavista asioista. Yhtenä osa-alueena projektissa oli teräksen tuottaja Ruukin ultralujien terästen särmättävyyden tutkiminen, joka toteutettiin yhdessä Oulun yliopiston kanssa. Tässä raportissa on esitetty Kemi-Tornion ammattikorkeakoululla Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmässä ja Optisen mittaustekniikan laboratoriossa tehtyjen särmäystutkimusten tuloksia.

Ultralujilla rakenne- ja kulutusteräksillä tarkoitetaan yleisesti teräslaatuja, joiden myötölujuus on yli 550N/mm² ja murtolujuus yli 700 N/mm². Teräkset valmistetaan suorasammutusmenetelmällä, jossa kontrolloidun kuumavalssauksen jälkeen teräs jäähdytetään eli sammutetaan välittömästi ilman uutta kuumennusta. Menetelmällä teräksen raekoko saadaan pidettyä pienenä ja sitkeyttä kasvatettua lujuudesta tinkimättä. [1]

Ruukin kulumista kestäviä teräksiä markkinoidaan tuotenimellä Raex, johon kuuluu neljä eri teräslajia: Raex 300, 400, 450 ja 500, numeroluvun kuvatessa materiaalin kovuutta HBW- yksiköissä. Raex- teräs on kova ja luja rakenneaine, joka kestää hankaavaa kulutusta ja kovaa pintapainetta. Raex-teräkset ovat karkaistuja, jonka vuoksi niillä on luja ja kova martensiittinen kiderakenne. Raex 400–500 -teräksillä kiderakenne on itsepäässyttä sälemartensiittia ja pääsemätöntä martensiittia. Ruukilla teräksen karkaisu tehdään ns. suorakarkaisulla, jossa teräs jäähdytetään nopeasti heti kuumavalssauksen jälkeen. Lisäksi kontrolloimalla valssausparametreja sekä seostusta, teräkseen saadaan erittäin kova ja luja mikrorakenne. Valmistusprosessin lopussa teräkselle tehdään vielä Dead Flat –käsittely eli oikaisuvalssaus, jossa nauhalevy kylmämuokataan koko paksuudeltaan. Käsittelyssä saadaan poistettua jäännösjännitykset sekä aikaansaadaan erinomainen tasomaisuus. [1]

Optim 700 QL on nuorrutettu rakenneteräs, jolla on erinomaiset sitkeysominaisuudet myös matalissa lämpötiloissa. Mikrorakenteeltaan ne ovat pääosin päästömartensiittisia. [3]

Optim 700 MC Plus on termomekaanisesti valssattu, korkean lujuuden Ti-Nb-mikroseostettu rakenneteräs, joka sopii hyvin yleiskäyttöön. Sen myötölujuus on yli 700 N/mm². Optim 700 MC Plussan mikrorakenne koostuu lähinnä kvasipolygonaalista ferriitistä ja granulaarisesta bainiitista. Perinteisempään 700-lujaan teräkseen verrattuna tämä teräs on erityisen hyvin muovattavaa. [2]

Optim QC on Ruukin käyttämä markkinointinimi sen ultralujille rakenneteräksille. Tuoteperheeseen kuuluu kolme teräslajia: Optim 900, 960 ja 1100 QC, numerotunnuksen ilmaistaessa lajin myötölujuuden vähimmäisarvoa N/mm²- yksiköissä. QC- teräkset ovat lujia, kohtuullisesti kulumista kestäviä sekä hyvin hitsattavissa ja särmättävissä. Lisäksi materiaali on hyvin kylmämuokattavissa sekä hitsattavissa ilman esilämmityksen tarvetta. Optim- teräkset valmistetaan samalla tavalla kuten Raex- teräksetkin, suorakarkaisulla ja sen jälkeisellä oikaisukäsittelyllä. Karkaisussa teräkseen muodostuu bainiittia ja martensiittia sisältävä mikrorakenne, jonka raekoko on keskimäärin yksi µm. Pieni raekoko mm. parantaa teräksen iskusitkeyttä sekä suurentaa erityisesti myötölujuutta ja kovuutta. [1]

Särmäminen on lujille teräksille yleisesti käytetty muovausmenetelmä konepajoissa. Teräksen lujuuden kasvaessa sen sitkeys kuitenkin huononee ja tämä asettaa särmämiselle rajoituksia. Liian pienellä taivutussäteellä särmättäessä teräksen muodonmuutoskyky ei riitä vaan siihen syntyy säröjä tai ns. mutterimaisuutta, jotka mahdollisesti heikentävät rakennetta ja huonontavat särmän ulkonäköä. Taivutuksessa teräs pyrkii joustamaan takaisin kimmoisesta muodonmuutoksesta johtuen ja takaisinjouston suuruus kasvaa teräksen lujuuden, taivutussäteen ja V-aukon mitan kasvaessa. Tämä pitää huomioida särmäyspuristimen ohjelmoinnissa ja työkalujen valinnassa. Myös särmäyksessä tarvittava voima kasvaa teräksen lujuuden kasvaessa mikä aiheuttaa vaatimuksia käytettäville laitteille.

2 Koemateriaalit ja menetelmät

2.1 KOEMATERIAALIT

Tutkittavat materiaalit olivat Ruukin ultralujia teräksiä, joiden paksuudet ja laatu olivat seuraavat: 10 mm Optim 700 MC Plus, 8 ja 10 mm Optim 700 QL, 8 mm Optim 960 QC, 8 ja 10 mm Raex 400 sekä 10 mm Raex 500. Koemateriaaleina käytettyjen terästen tyypilliset koostumukset on esitetty taulukossa 1 ja tyypilliset mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 2 [4-7].

Näytteet toimitettiin leikattuna määrämittaan ja ne olivat leveydeltään (=taivutuspi-tuus) 285 mm. Näytteiden taivutuslinjan suhteen kohtisuorassa oleva mitta vaihteli 285...800 mm teräslaadusta ja käytetyistä työkaluista riippuen.

Taulukko 1.Koemateriaalit ja niiden paksuudet sekä tyypillinen koostumus.

Teräslaji	C	SI	Mn	P	S	B	Cr	NI	Cu	Mo	TI	Al
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Min
Optim 700 MC Plus	0,10	0,50	2,10	0,020	0,010							0,015
Optim 700 QL	0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	0,005	1,50		0,50	0,70		
Optim 960 QC	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010						0,070	
Raex 400	0,25	0,80	1,70	0,025	0,015	0,005	1,50	1,00		0,50		
Raex 500	0,30	0,80	1,70	0,025	0,150	0,005	1,00	1,00		0,50		

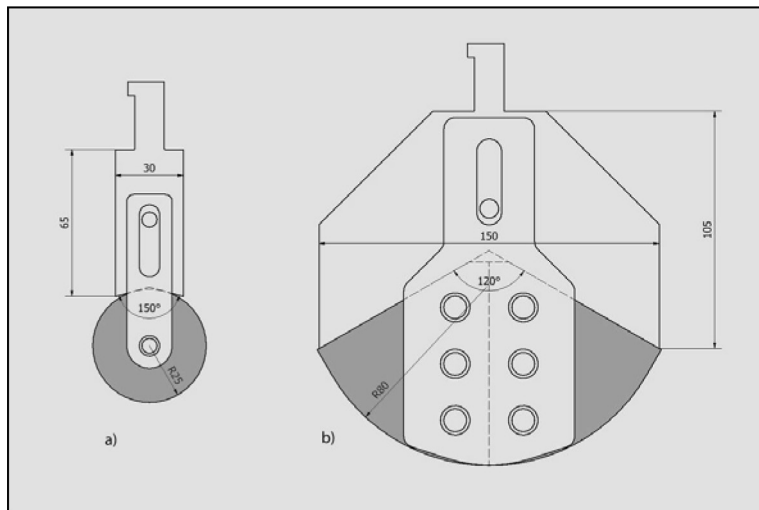
Taulukko 2.Koemateriaalien tyypilliset mekaaniset ominaisuudet.

Teräslaji	Rp _{0,2} min	Rm min	A5 min	Charpy V min	
	N/mm ²	N/mm ²	%	T (°C)	J
Optim 700 MC Plus	700	750-930	15	-20	40
Optim 700 QL	690	770-940	14	-40	30
Optim 960 QC	960	1000	7	-40	34
Raex 400	1000	1250	10	-40	20
Raex 500	1250	1600	8	-30	20

2.2 KOEMENETELMÄT

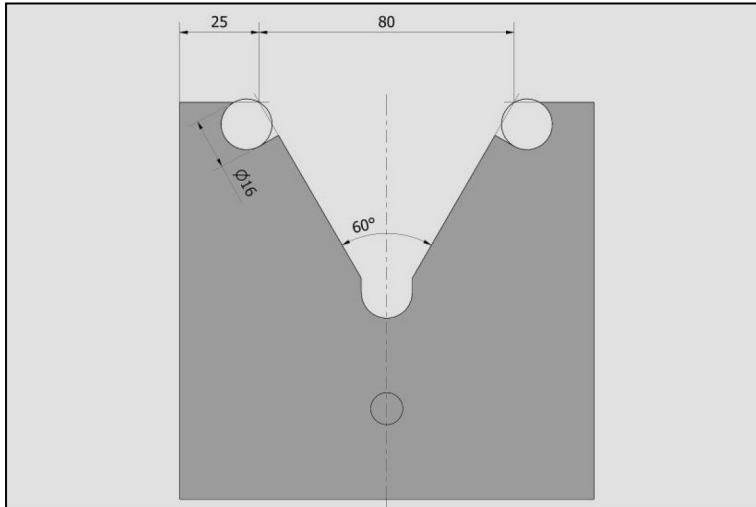
2.2.1 Särmäyspuristin ja työkalut

Särmäyskokeissa käytettiin ALIKO SP 3000-220 tyyppistä CNC-ohjattua hydraulista särmäyspuristinta, jonka maksimivoima on 2200 kN. Kokeita varten suunniteltiin ja valmistettiin särmäyspituudeltaan max 400 mm:n painin- ja vastintyökalut. Painimien säteet vaihtelivat välillä 5...120 mm. Vastimissa V-aukon leveys vaihteli välillä 80...270 mm. Painimet 5...60 mm:n säteellä valmistettiin sorvatusta tangosta, joka kiinnitettiin särmäyspuristimen palkkiin sopivaan S355 teräksestä valmistettuun pitimeen, kuva 1a. Tangot olivat materiaaliltaan MoC 410 terästä, joka karkaistiin n. 37 HRC kovuuteen. Kuvassa 1b on esitetty 80...120 mm:n painimien rakenne. Painin koostuu kahdesta koneistetusta ja karkaistusta MoC 410 teräksestä valmistetusta puolikkaasta, jotka kiinnitettiin S355 teräksestä valmistettuun pitimeen.

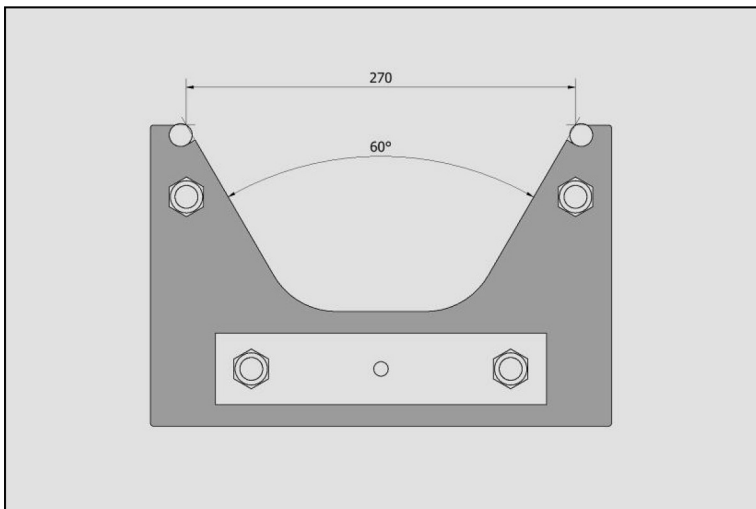


Kuva 1. Painimien rakenne: a) R5...R60 mm, b) R80...R120 mm.

V-aukon mitaltaan pienimmät vastimet V80...V130 valmistettiin koneistamalla S355 teräksestä valmistetusta neliötangosta. Suuremmat vastimet V160...V270 valmistettiin lamelleista leikkaamalla laserilla 10 mm:n S355 levystä V-aukon muotoisia leikkeitä, jotka kiinnitettiin toisiinsa nippuun kierretangoilla. Vastimien halkaisijoiltaan 16 mm:n tuurnat valmistettiin MoC 410 teräksestä ja karkaistiin n. 37 HRC:n kovuuteen. V-aukon kulma oli kaikissa työkaluissa 60°. Kuvassa 2 on esitetty vastimen V80 mitat, joista selviää V-aukon mitoitusperiaate, joka oli kaikissa tapauksissa sama. Kuvassa 3 on esitetty lamellimaisen työkalun rakenne.



Kuva 2. Vastimien V80, V100 ja V130 rakenne ja V-aukon mitoitusperiaate.



Kuva 3. Lamelleista valmistettujen vastintyökalujen V160, V200, V240 ja V270 rakenne.

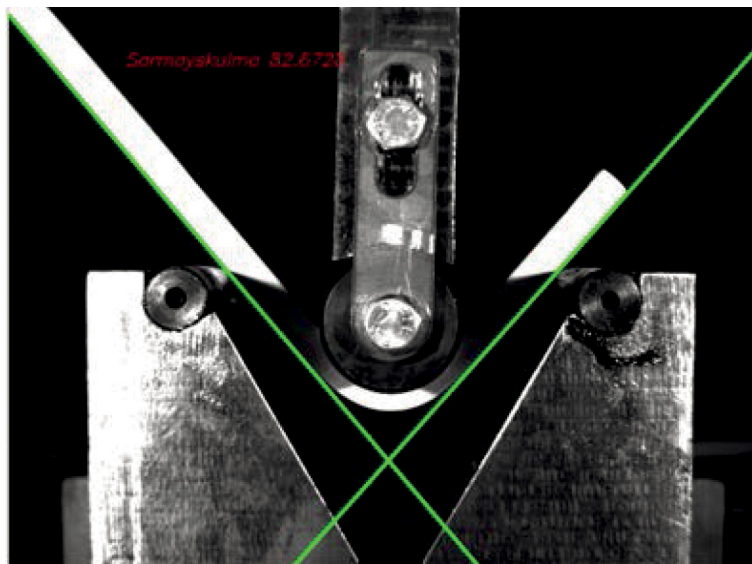
2.2.2 Taivutusvoimien mittaus

Särmäyskokeiden aikana mitattiin taivutusvoima. Voiman mittausta tapahtui mittamalla painetta toisesta sylinteristä ja muuttamalla paineen arvot voimiksi suorittamalla kalibrointi voima-anturin avulla. Paineanturi oli tyypiltään WIKA A-10 (Pressure transmitter for general industrial applications). Särmäyskokeissa rekisteröitiin paineanturin antamat lukemat käyttäen 0,1 s:n aikaväliä. Tiedonkeruuseen käytettiin LabView-ohjelmaa. Paineanturi kalibrointiin käytetty voima-anturi oli tyypiltään SCELL CA model 250 t.

2.2.3 Takaisinjoustojen mittaus

Särmäystapahtuman takaisinjousto mitattiin konenäön avulla. Särmäystapahtuma kuvattiin kameralla ja kuvista mitattiin kehitetyllä menetelmällä automaattisesti takaisinjouston suuruus. Mittausmenetelmässä tunnistetaan levyn reunat ja niihin sovitetaan suorat. Suorien avulla määritetään särmäty kulma ja takaisinjouston suuruus. Mittaus on havainnollistettu kuvassa 4.

Mittausympäristö särmäyslaitteistossa on esitetty kuvassa 5. Laitteisto koostui kamerasta, optiikasta, valaistuksesta ja tietokoneesta. Kamera oli Basler A602f ja käytetty optiikka oli Schneider Kreuznach CINEGON 1:1.8/10. Valaisimena käytettiin kahta teholedyä, jotka valaisivat levyn reunan edestäpäin. Kamera kuvasi levyn reunoja valojen välistä.



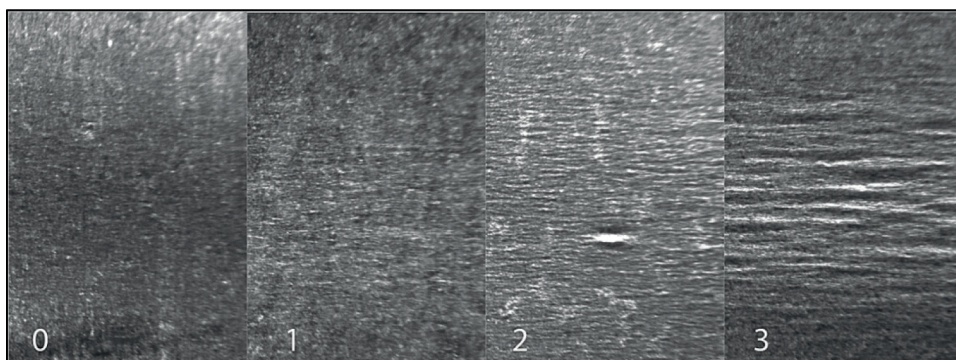
Kuva 4. Takaisinjouston mittausympäristö.



Kuva 5. Takaisinjouston mittaaminen konenäön avulla.

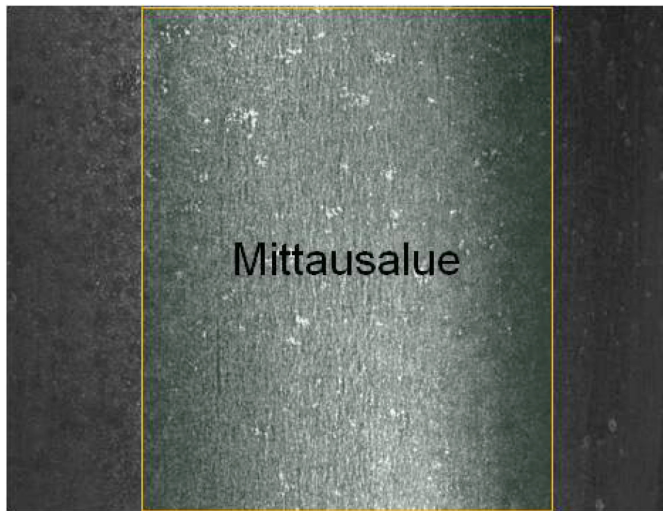
2.2.4 Säröasteen määrittäminen

Säröytymisasteet määritettiin silmämääräisesti sekä konenäköön perustuvalla menetelmällä. Silmämääräisessä määrittämisessä säröytymisasteelle käytettiin neljää luokkaa 0...3, joista 0 oli lievin ja 3 pahin säröytymisen aste. Kuvassa 6 on esitetty konenäöllä kuvatut silmämääräiseltä säröasteeltaan 0...3 olevat näytteet.

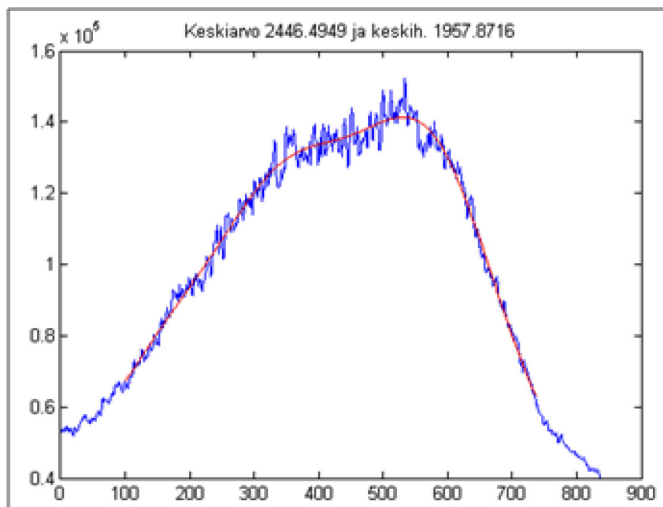


Kuva 6. Säröasteiden luokat 0-3.

Konenäköön perustuva säröasteen määrittäminen tapahtui seuraavasti: Särön taiteesta otettiin kuva, jonka korkeus oli 31 mm, kuva 7a. Kuvasta rajattiin mittausalue, josta määriteltiin säröytymisaste. Mittausalueelta laskettiin sarakkeen suuntainen harmaasävyjen summa (sininen käyrä). Summakäyrään sovitettiin 13 asteen polynomi, joka esitetään punaisella käyrällä kuvassa 7b. Summakäyrän ja sovitetun käyrän välille laskettiin erotus jokaisessa sarakkeen kohdassa ja erotuksista laskettiin keskiarvo. Säröytymisen tunnuslukuna käytettiin laskettua keskiarvoa. Mitä suurempi tunnusluku oli sitä suurempi oli säröytymisaste. Koko näytteestä jouduttiin ottamaan 10 kuvaa, koska kerralla kuvattiin 31 mm korkuista aluetta. Koko näytteen säröytymisaste määritettiin laskemalla keskiarvo alueiden säröytymisen tunnusluvuista.



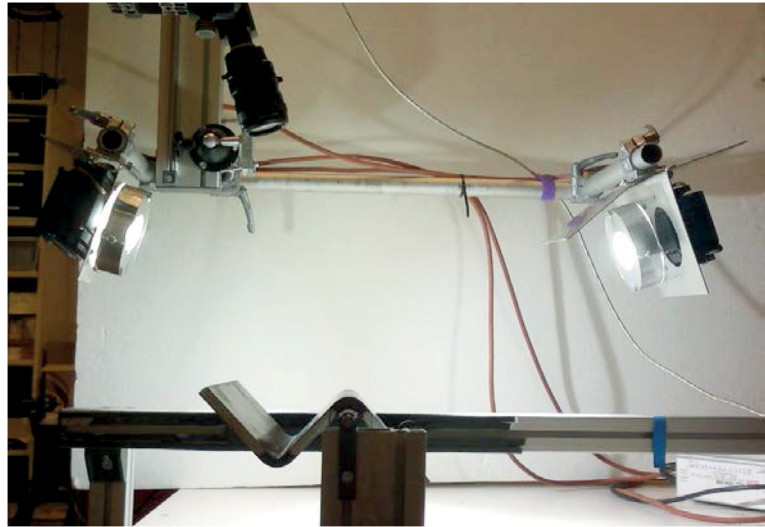
a)



b)

Kuva 7. a) Säröytymisen mittausalue ja b) summakäyrän sovitus.

Mittausympäristö säröytymisen määrittämisessä on esitetty kuvassa 8. Kamerana käytettiin FOculus IEEE934, optiikkana Linos MeVis-C 50 mm ja valaistukseen kahta teholedyä. Ledeillä valaistiin kohdetta sivuilta ja kamera kuvasi kohteen yläpuolelta särmän taivetta.



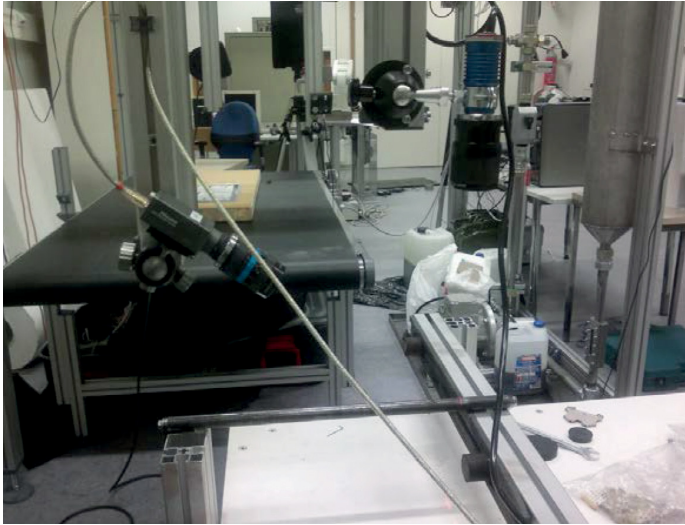
Kuva 8. Säröytymisen mittausympäristö.

2.2.5 Mutterimaisuus konenäöllä

Mutterimaisuuden mittaamiseen kehitettiin alustava menetelmä. Mittaamisessa hyödynnettiin kameraa ja viivan tuottavaa ledvaloa. Taipeen alueelle heijastettiin viiva, jonka reuna tunnistettiin ja reunaan sovitettiin ellipsi. Ellipsin säteiden suhde määrittää mutterimaisuuden. Viiva ja sovitettu ellipsi on esitetty kuvassa 11, jossa oikean puoleisessa näytteessä oli selvästi havaittavissa oleva mutterimaisuus.

Mutterimaisuuden mittausympäristö on esitetty kuvassa 9. Kamerana käytettiin FOculus IEEE394, joka kuvasi kohdetta vinosti noin 35 asteen kulmassa. Viivaledvalona käytettiin Optoengineering OELTPR₃WR, jossa käytettiin 55 mm polttovälin telesentristä optiikkaa. Ledvalo heijastettiin kohtisuorasti kohteen yläpuolelta.

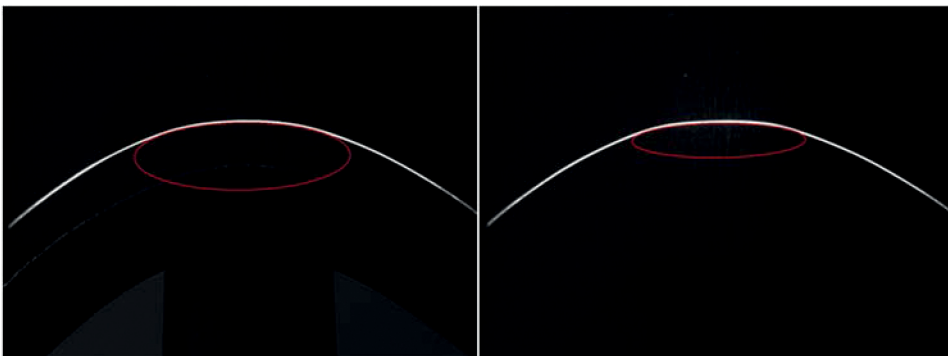
Ledvaloa ja laservaloa testattiin mutterimaisuuden määrittelyssä. Laservalo muodostaa taipeen pintaan sahalaitaisen viivan, josta ei pystytä helposti havaitsemaan mutterimaisuutta. Ledvalolla kohteen pintaan muodostuu teräväreunainen viiva, josta mutterimaisuus on mahdollista tunnistaa.



Kuva 9. Mutterimaisuuden mittausympäristö.



Kuva 10. Ledvalon ja laservalon testausta mutterimaisuuden määrittelyssä.



Kuva 11. Heijastettu ledviiva taieessa ja sovitettu ellipsi. Oikean puoleisessa näytteessä mutterimaisuutta.

2.2.6 Kovuusmittaukset ja mikrorakennetarkastelut

Joistakin särmätyistä koekappaleista leikattiin näytteet kovuusmittauksia ja mikrorakennetarkasteluja varten. Särmän poikkileikkauksista tehtiin hieet ja syövytettiin liuoksessa, jossa oli 3 ml/l HNO_3 + etanolia syövytysajan ollessa n. 10 s. Poikkileikkauksista tehtiin kovuusmittaukset (HV₅) särmän alueelta taivutussäteen suuntaisilta janoilta 0,25 mm välein ja tarkasteltiin mikrorakenteita valomikroskoopilla.

2.3 KOEMATRIISI JA KOKEIDEN SUORITUS

Särmäyskokeet tehtiin 90 asteen kulmaan erilaisilla työkaluyhdistelmillä ja lisäksi valssaussuuntaan nähden pitkittäin ja poikittain (PI=taivutuslinja pitkittäin valssaussuuntaan, PO=taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan), kaikille näytteille tehtiin Z-särmäys (A- ja B-puoli) ja toistokokeita tehtiin 5 kpl/työkaluyhdistelmä.

Koematriisi suunniteltiin kyseisille teräksille annettujen Ruukin ohjearvojen pohjalta. Ohjearvot on esitetty taulukossa 3. Kokeet aloitettiin ohjearvojen tuntumasta ja siitä siirryttiin pienempään tai suurempaan taivutussäteeseen riippuen säröytymisestä ja mutterimaisuudesta. Taulukossa 4 on esitetty toteutettu koematriisi ja toistokokeiden määrä/työkaluyhdistelmä.

Taulukko 3. Ruukin ohjearvot testatuille teräksille ja paksuuksille [4-8].

Teräslaji	Paks. (mm)	Painin	Rmin	Vastin	
		Paksuus(mm)	mm	V/t(min)	V
Optim 700 MC Plus	10	>8≤10	10	-	-
		>10≤12	18	-	-
Optim 700 QL	8	>7≤8	24	-	-
		>8≤10	30	-	-
Optim 700 QL	10	>8≤10	30	-	-
		>10≤12	36	-	-
Optim 960 QC	8		28	-	-
Raex 400	8	PI	36	11	88
		PO	25	9	72
Raex 400	10	PI	40	11	110
		PO	30	9	90
Raex 500	10	PI	120	27	270
		PO	100	23	230

Taulukko 4. Toteutunut koematriisi ja toistokokeiden määrä/työkaluyhdistelmä.

Koemateriaali	Paksuus	V-aukko (mm)	Taivutussäde R (mm)								
			8	11	18	25	32	40	60	80	100
Optim 700 MC Plus	10	80	5	5	5						
		100	5	5							
		130	5								
Optim 700 QL	8	80		5	5	5					
		100		5	5						
		130		5							
Optim 700 QL	10	80		5	5	5					
		100		5	5		5				
		130		5							
Optim 960 QC	8	80			5	5	5				
		100			5	5					
		130			5						
Raex 400	8	80			5	5	5				
		100			5	5					
		130			5						
Raex 400	10	130				5	5	5			
		160				5	5				
		200				5					
Raex 500	10	200					3	4	4		
		240								5	5
		270								5	5

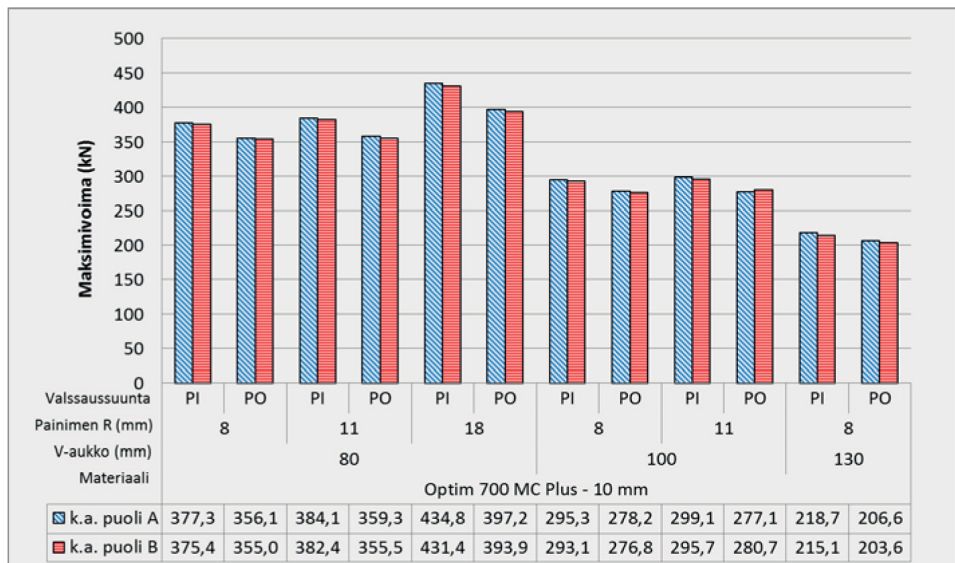
Taulukosta saadaan kokeiden määräksi yhteensä 216 ja kun kokeita tehtiin lisäksi eri valssaussuuntiin, PI/PO (2 koetta) ja särmäys tehtiin Z-särmäyksenä molemmille puolille (2 koetta), tuli lopulliseksi määräksi $2 \times 2 \times 216 = 864$. Eräissä kuvissa ja joissakin kohdissa tekstissä on käytetty näytetunnuksia, jotka ovat täydellisenä muotoa: materiaali-paksuus-valssaussuunta-painin-vastin-puoli. Esim. O700QL-8-PI-R8-V80-A tarkoittaa 8 mm:n Optim 700 QL terästä, joka on särmäetty taivutuslinja pitkittäin valssaussuuntaan nähden säteeltään 8 mm:n painimella 80 mm:n V-aukkoon ja kyse on särmäyksestä, joka on tehty merkkäuspuoli ylöspäin

3 Tulokset

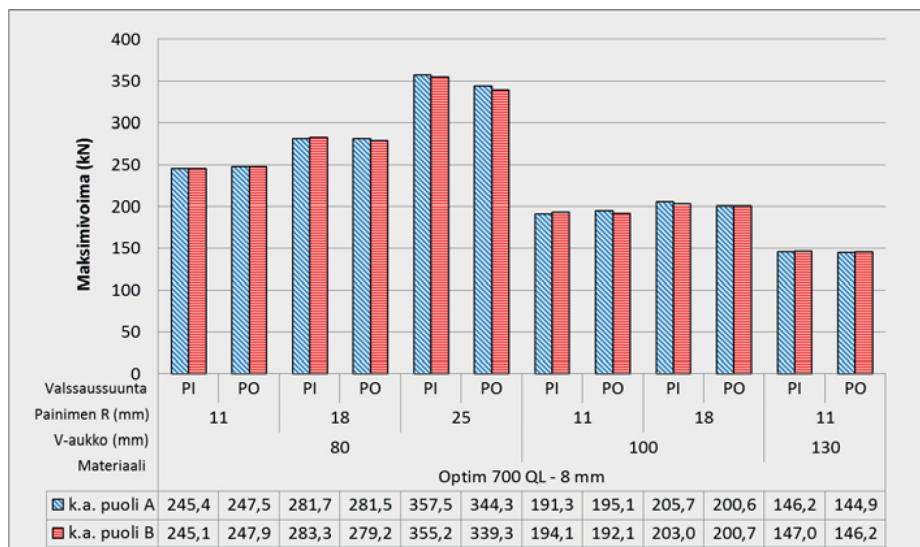
3.1 TAIVUTUSVOIMAT

3.1.1 Maksimivoimat

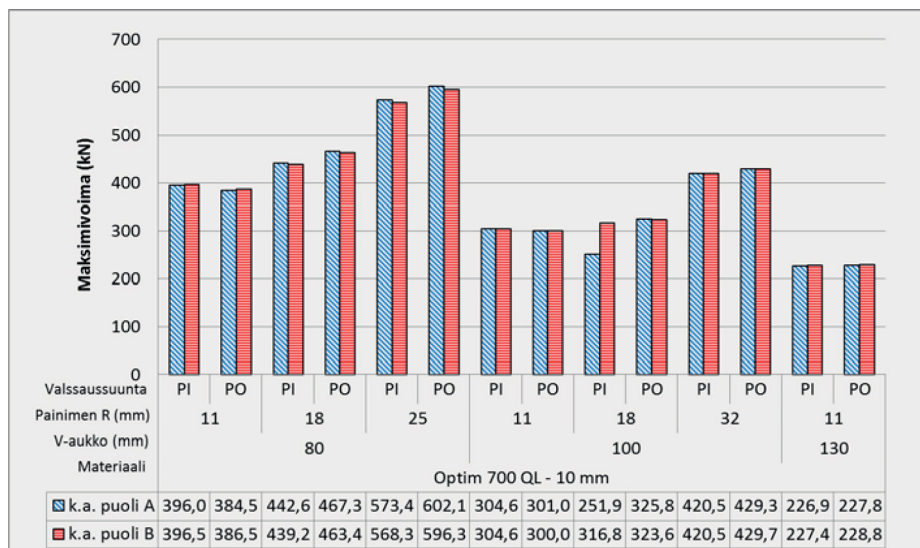
Kuvissa 12-18 on esitetty särmäyskokeissa mitatut maksimivoimat eri materiaaleille ja työkaluyhdistelmille. Maksimivoimat ovat toistokokeessa saatujen tulosten keskiarvoja. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden) ja A-puoli on särmätty näytteen merkkaukspuoli ylöspäin, B-puoli merkkaukspuoli alaspäin.



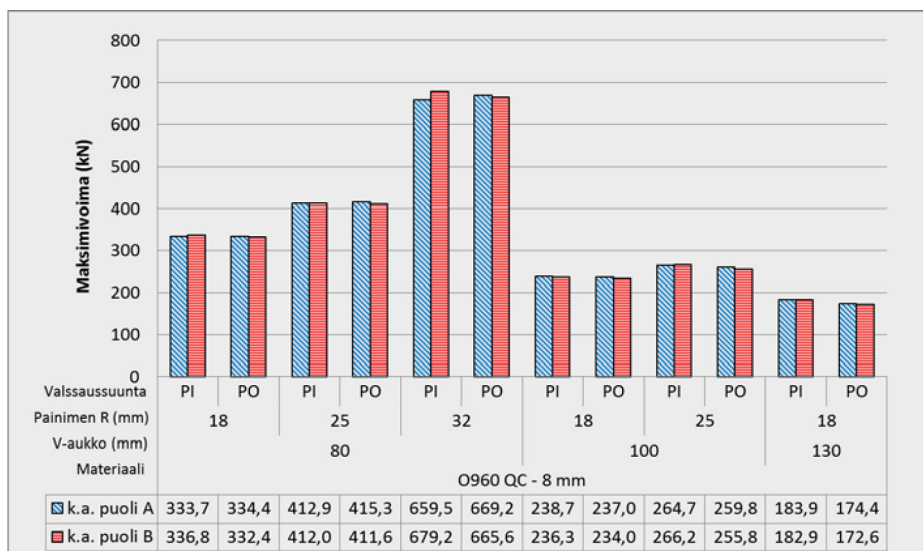
Kuva 12. Maksimivoimat 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



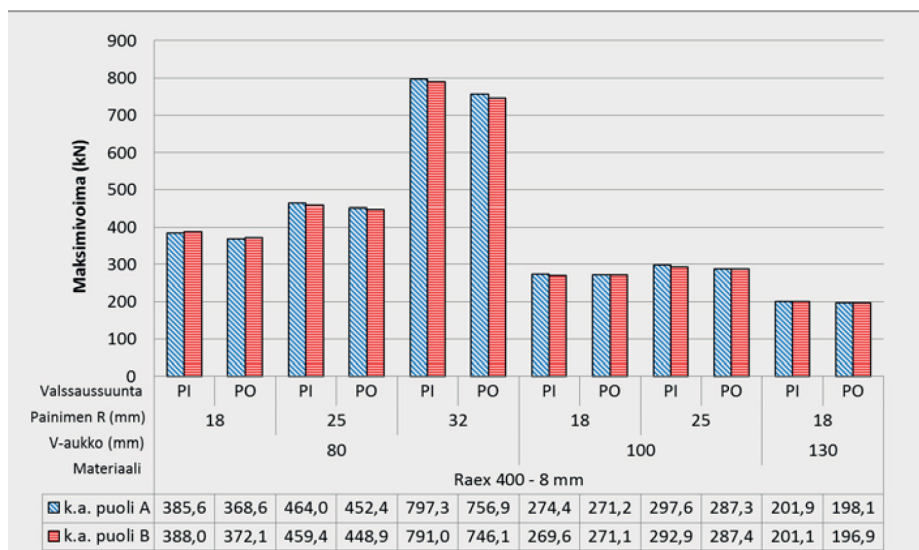
Kuva 13. Maksimivoimat 8 mm Optim 700 QL teräksellä.



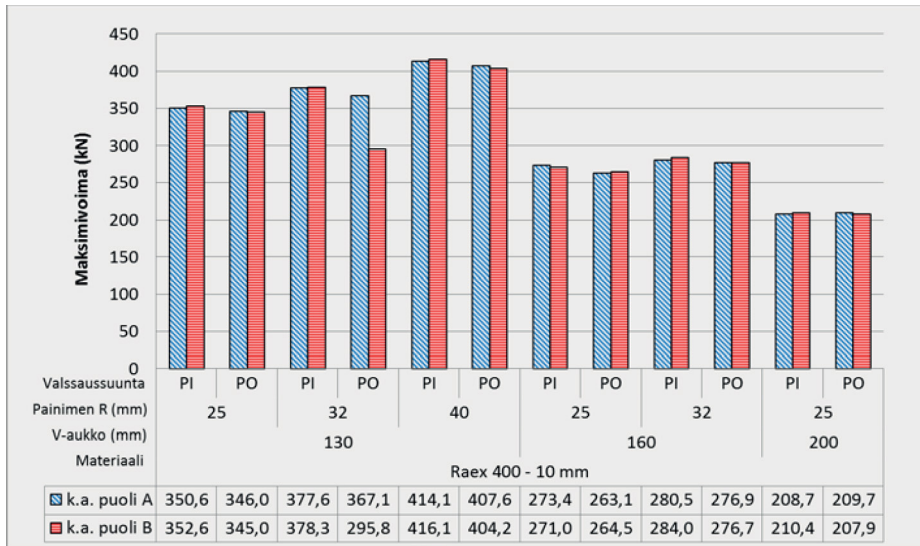
Kuva 14. Maksimivoimat 10 mm Optim 700 QL teräksellä.



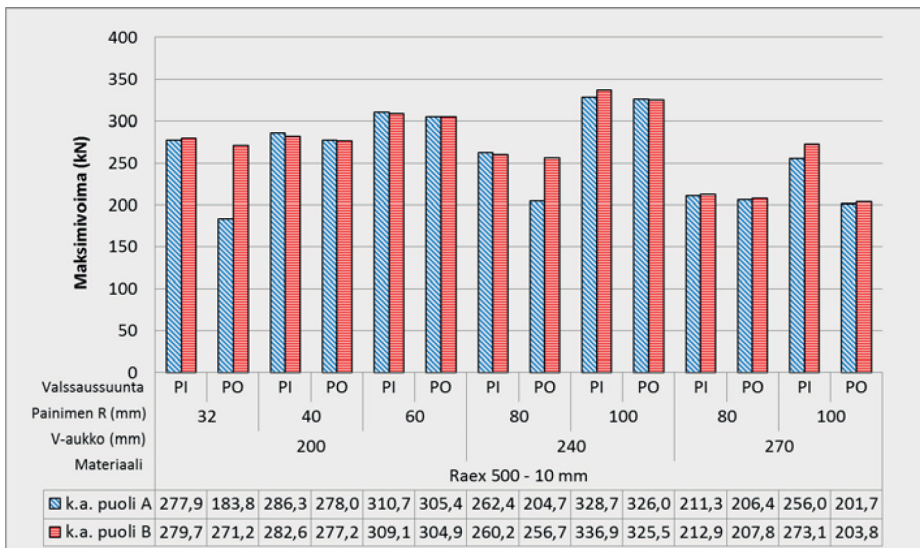
Kuva 15. Maksimivoimat 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



Kuva 16. Maksimivoimat 8 mm Raex 400 teräksellä.



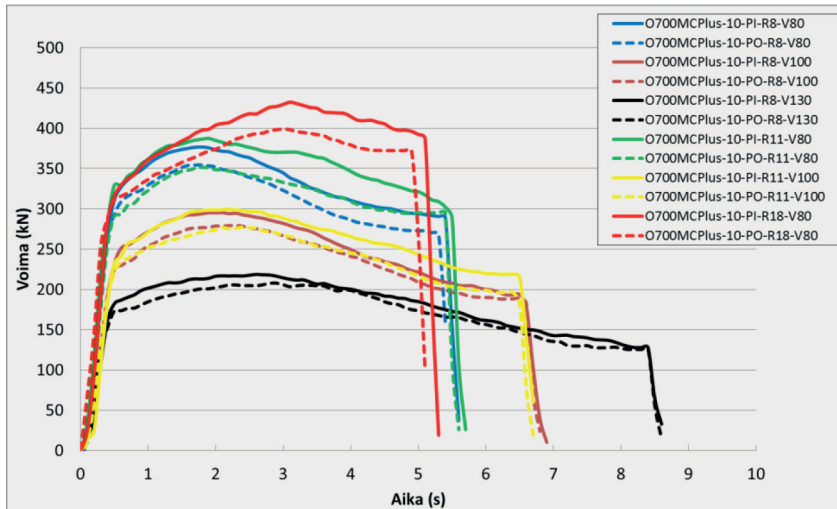
Kuva 17. Maksimivoimat 10 mm Raex 400 teräksellä.



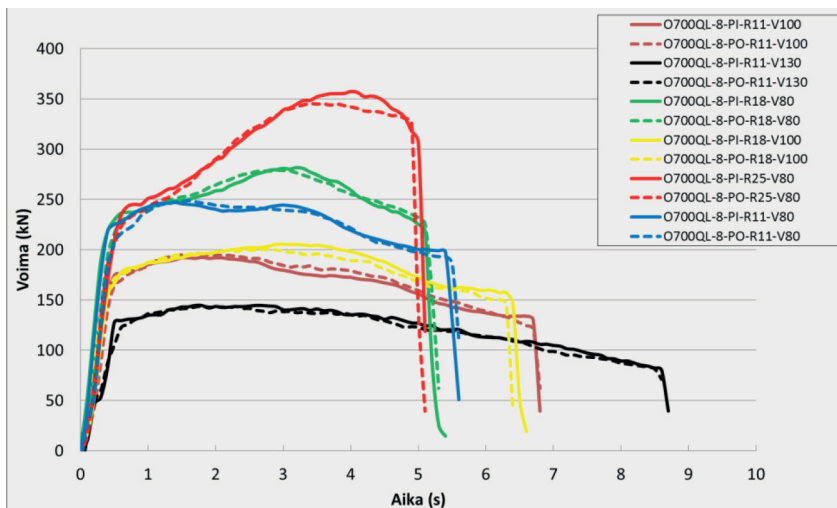
Kuva 18. Maksimivoimat 10 mm Raex 500 teräksellä.

3.1.2 Voimakäyrät

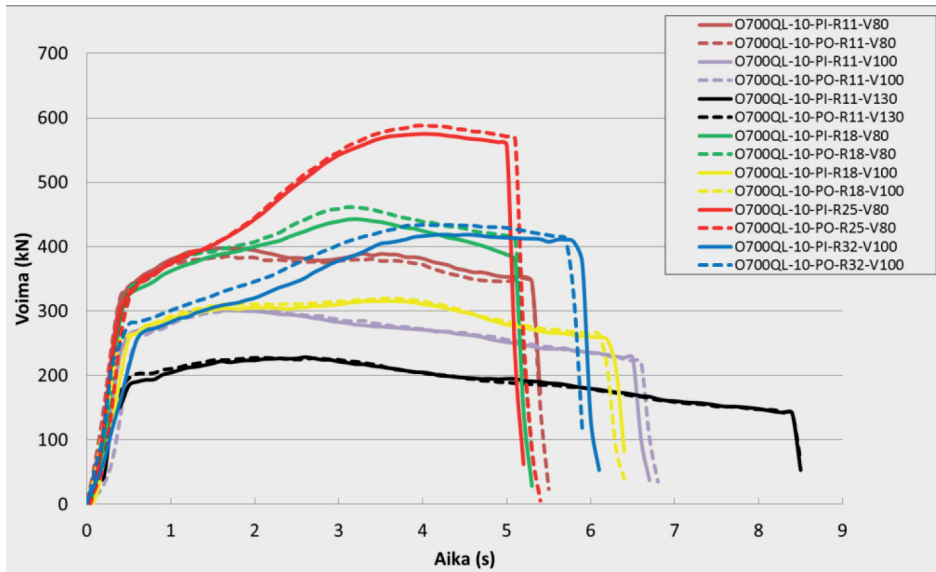
Kuvissa 19-25 on esitetty särmäyskokeissa mitatut voimakäyrät eri materiaaleille ja työkaluyhdistelmille. Käyrä edustaa yhtä särmäyskoetta ja on valittu siten, että kyseisessä kokeessa maksimivoima on lähimpänä maksimivoiman keskiarvoa. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden). Voimakäyrät ovat kaikki kokeista, joissa särmäys on tehty näytteen merkkapuoli ylöspäin (koe A).



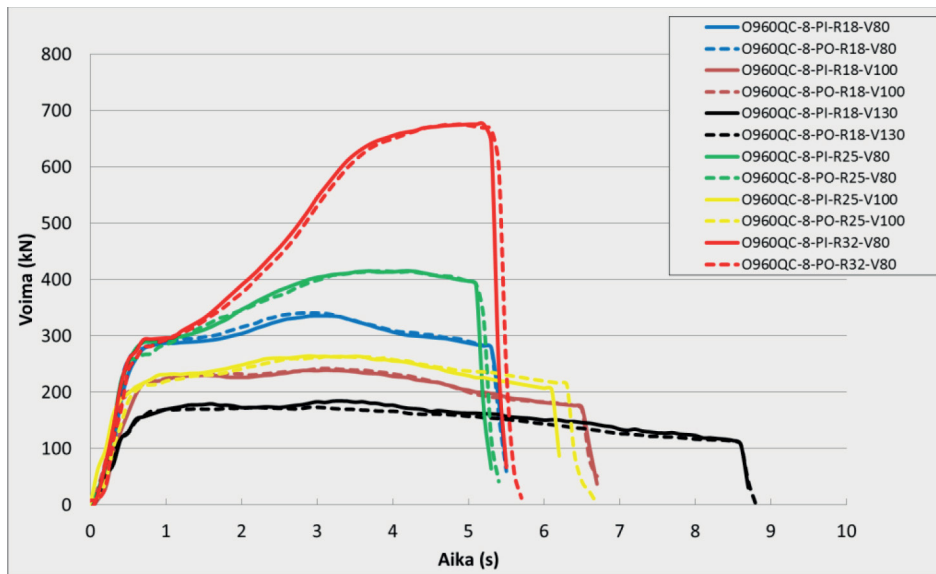
Kuva 19. Voimakäyrät 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



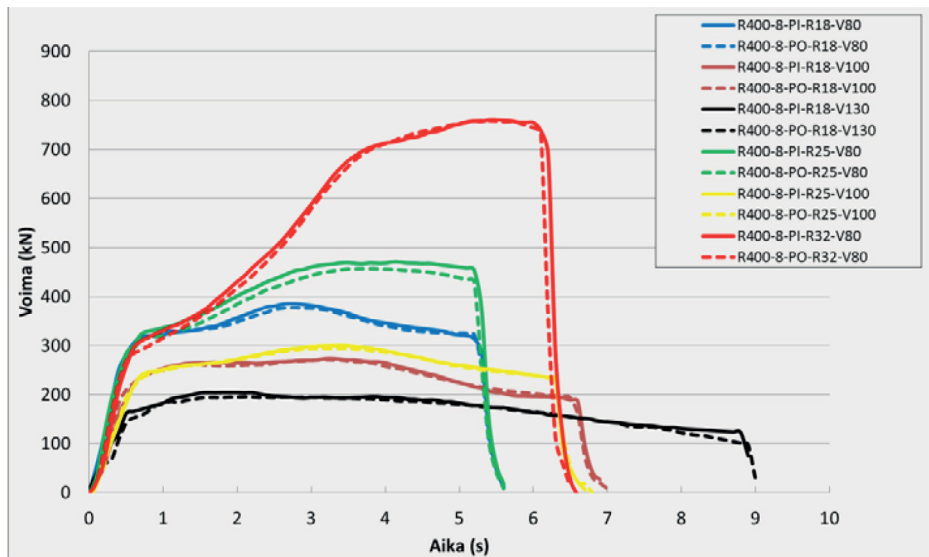
Kuva 20. Voimakäyrät 8 mm Optim 700 QL teräksellä.



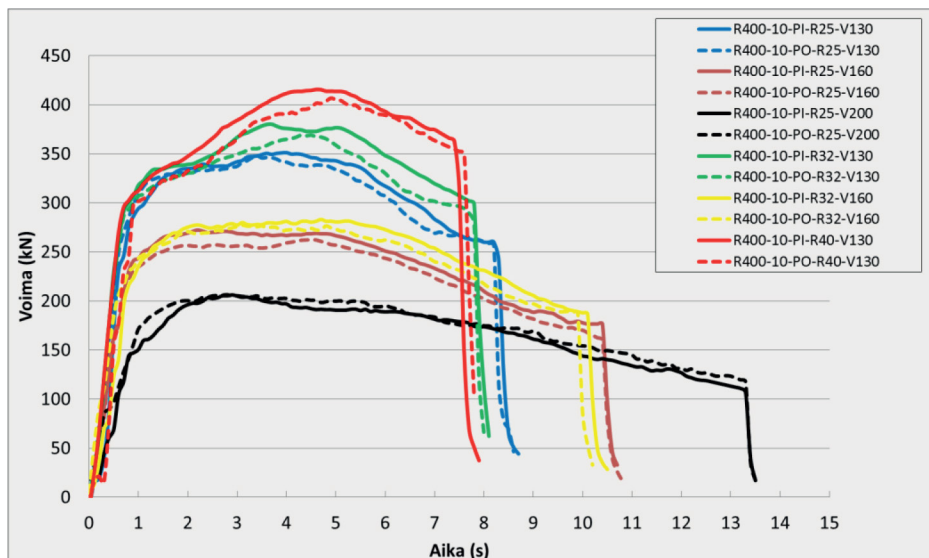
Kuva 21. Voimakäyrät 10 mm Optim 700 QL teräksellä.



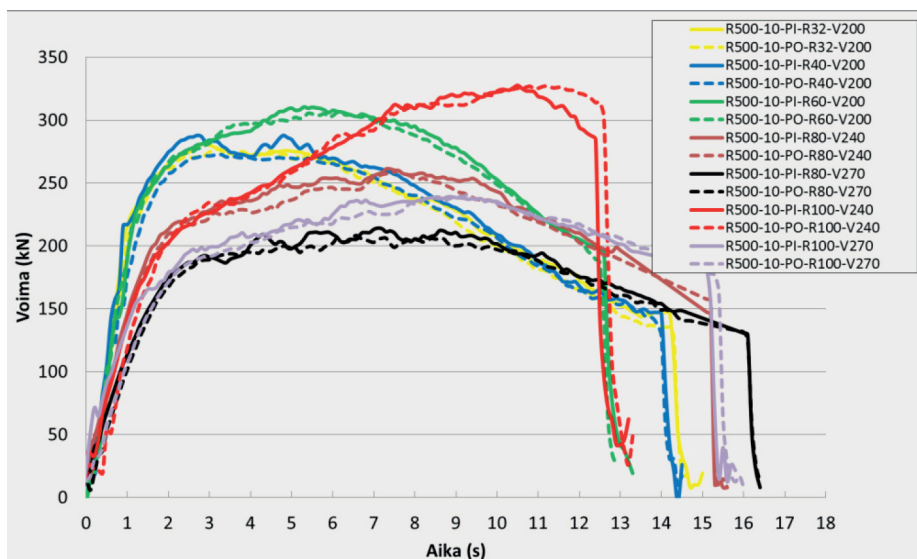
Kuva 22. Voimakäyrät 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



Kuva 23. Voimakäyrät 8 mm Raex 400 teräksellä.



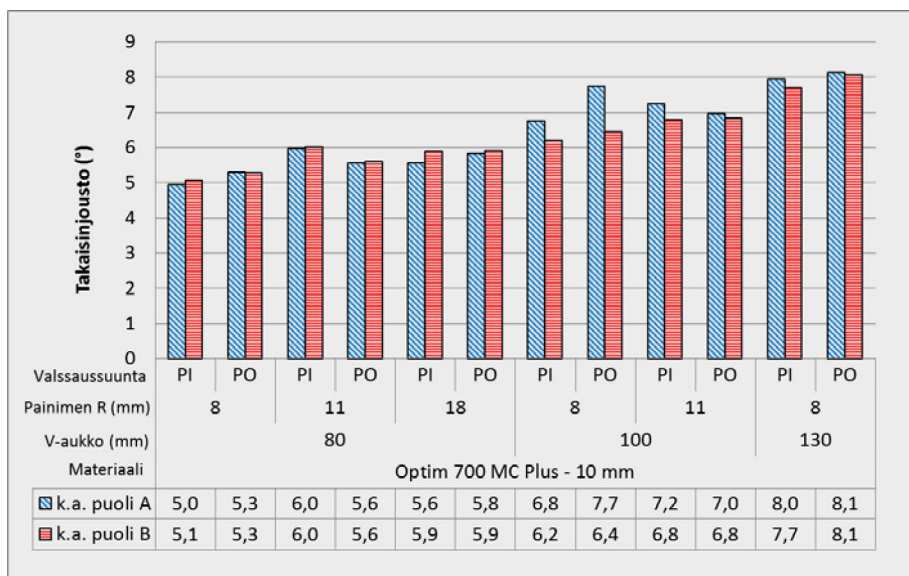
Kuva 24. Voimakäyrät 10 mm Raex 400 teräksellä.



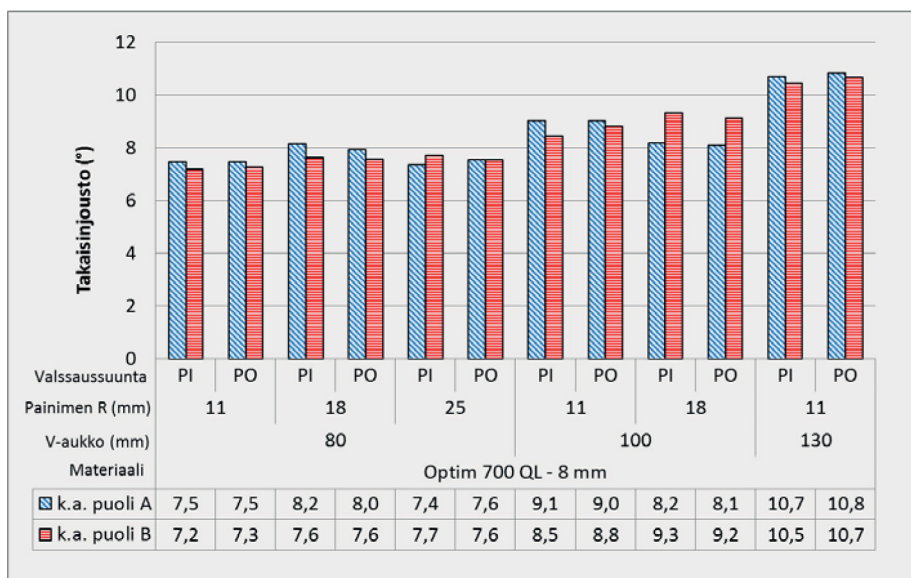
Kuva 25. Voimakäyrät 10 mm Raex 500 teräksellä.

3.2 TAKAISINJOUSTOT

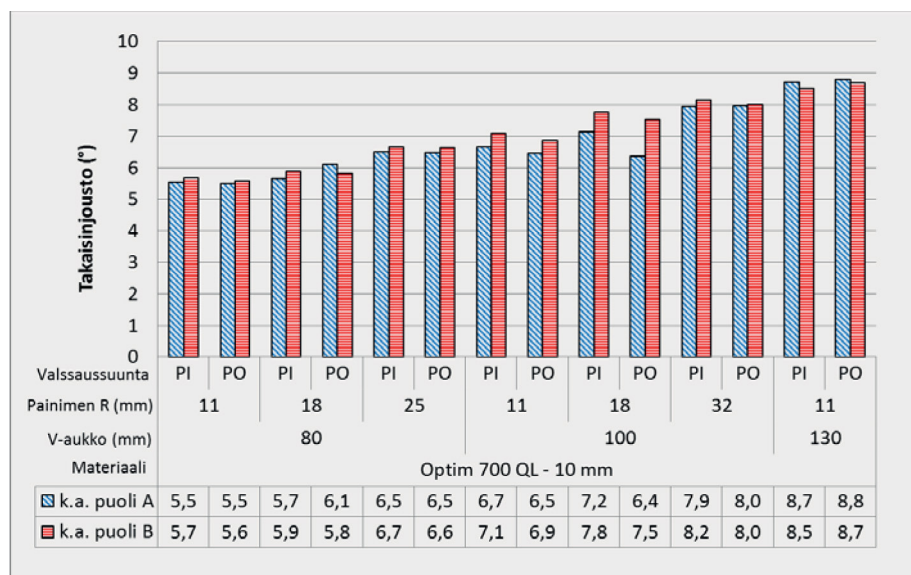
Kuvissa 26-32 on esitetty särmäyskokeissa mitatut takaisinjoustopot eri materiaaleille ja työkaluyhdistelmille. Takaisinjoustopot ovat toistokokeessa saatujen tulosten keskiarvoja. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden) ja A-puoli on särmätty näytteen merkkapuoli ylöspäin, B-puoli merkkapuoli alaspäin.



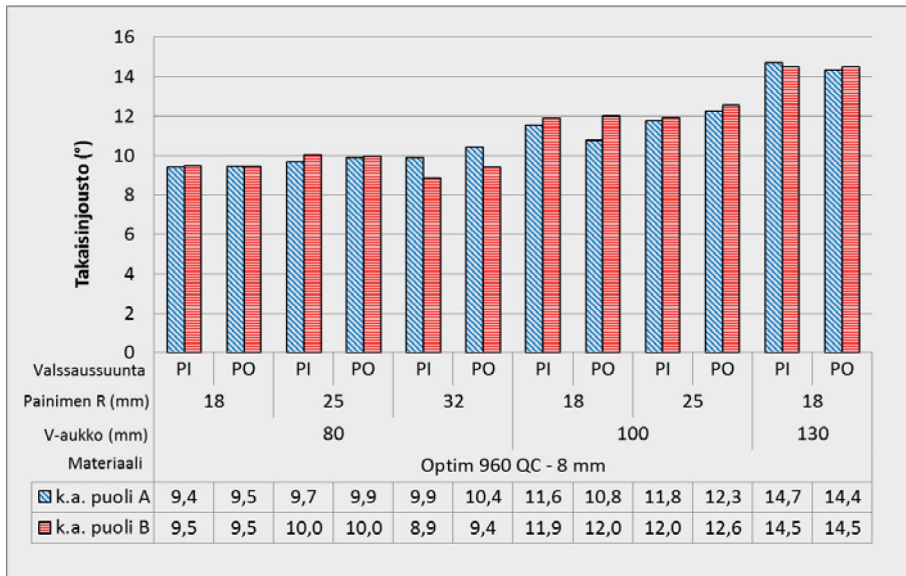
Kuva 26. Takaisinjoustopot 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



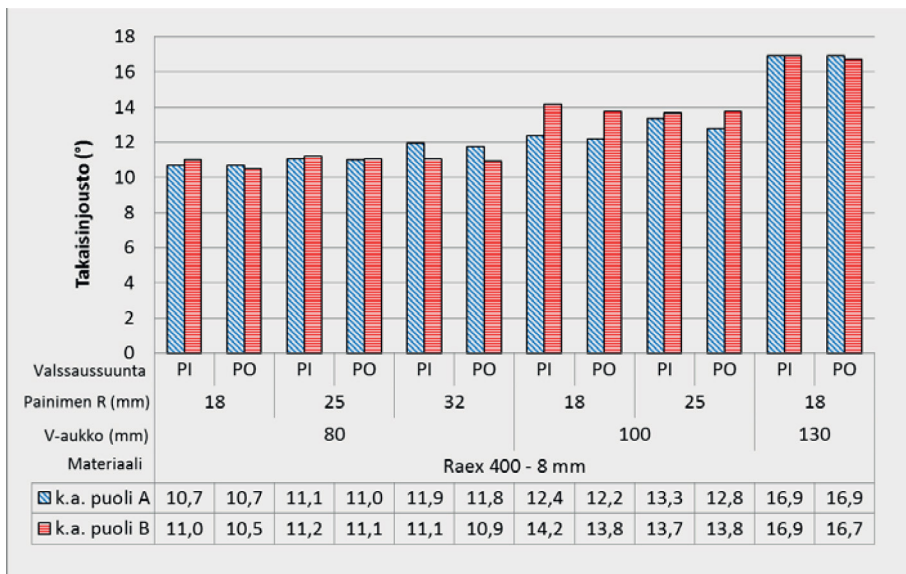
Kuva 27. Takaisinjoustot 8 mm Optim 700 QL teräksellä.



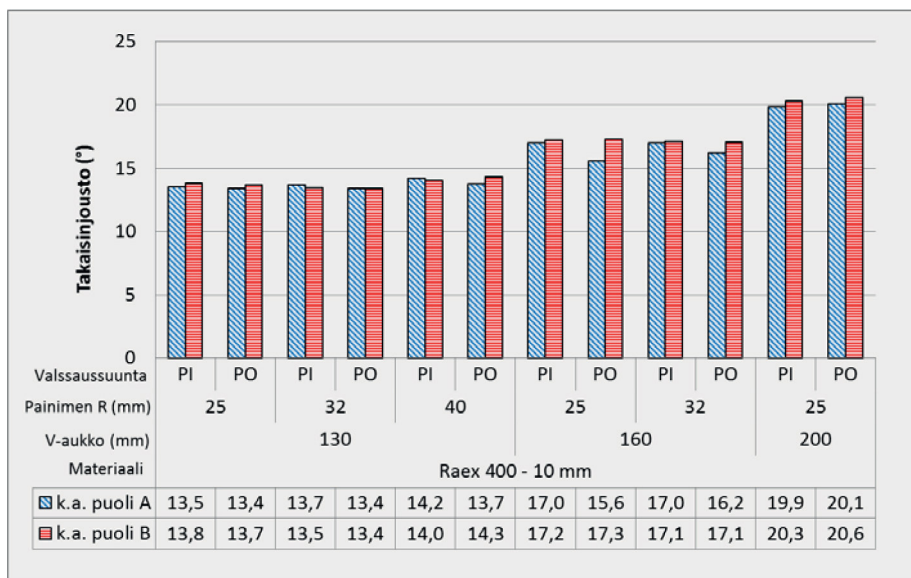
Kuva 28. Takaisinjoustot 10 mm Optim 700 QL teräksellä.



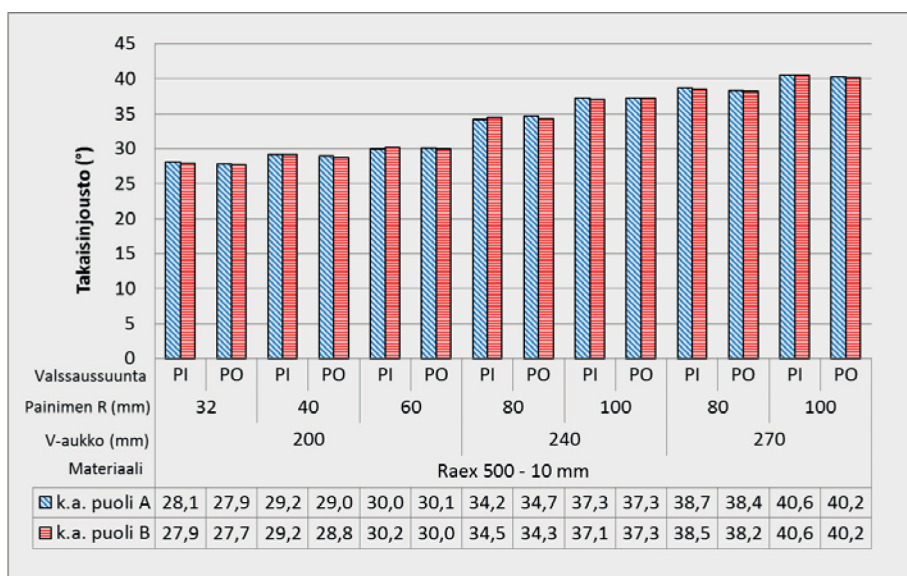
Kuva 29. Takaisinjoustot 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



Kuva 30. Takaisinjoustot 8 mm Raex 400 teräksellä.



Kuva 31. Takaisinjoustot 10 mm Raex 400 teräksellä.

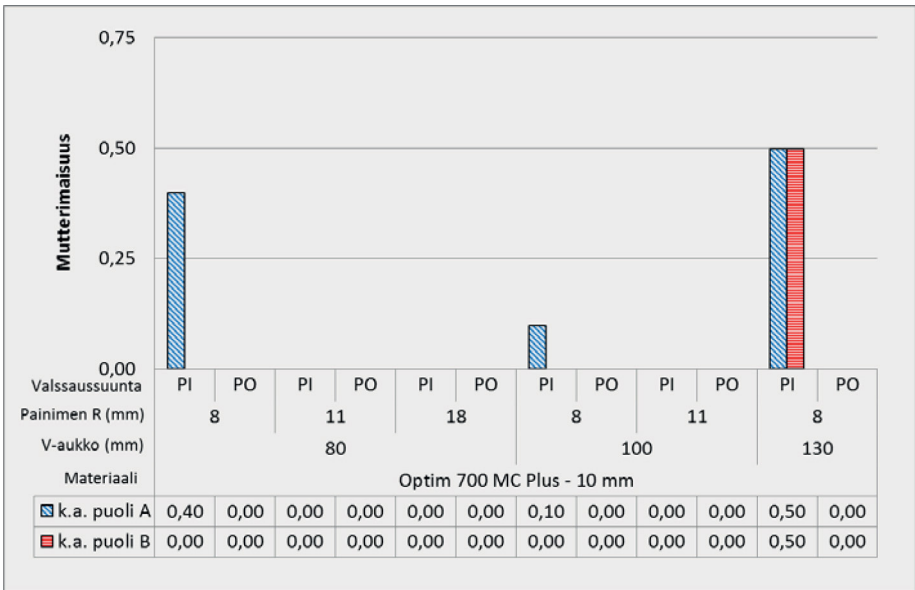


Kuva 32. Takaisinjoustot 10 mm Raex 500 teräksellä.

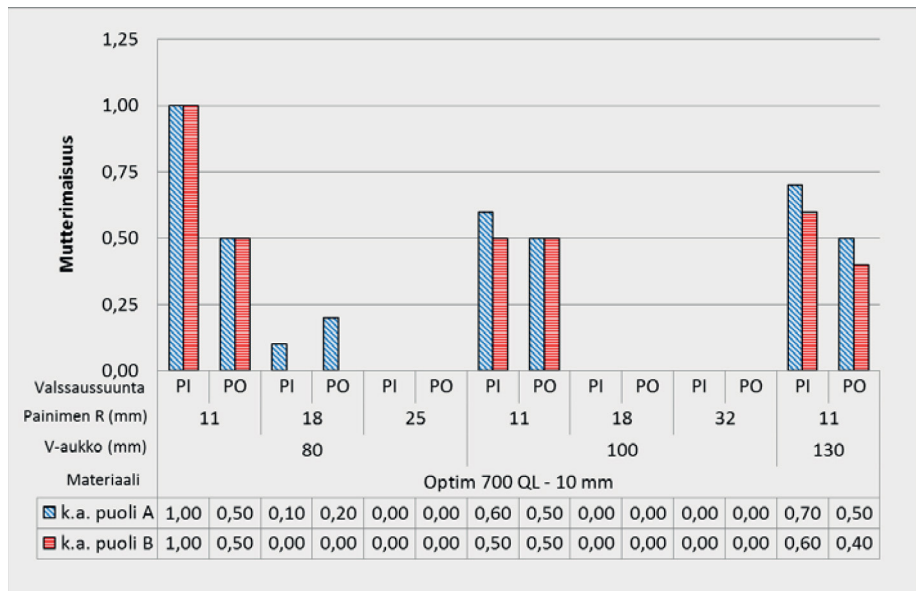
3.3 SÄRMÄN ULKOREUNAN TARKASTELUT

3.3.1 Mutterimaisuus

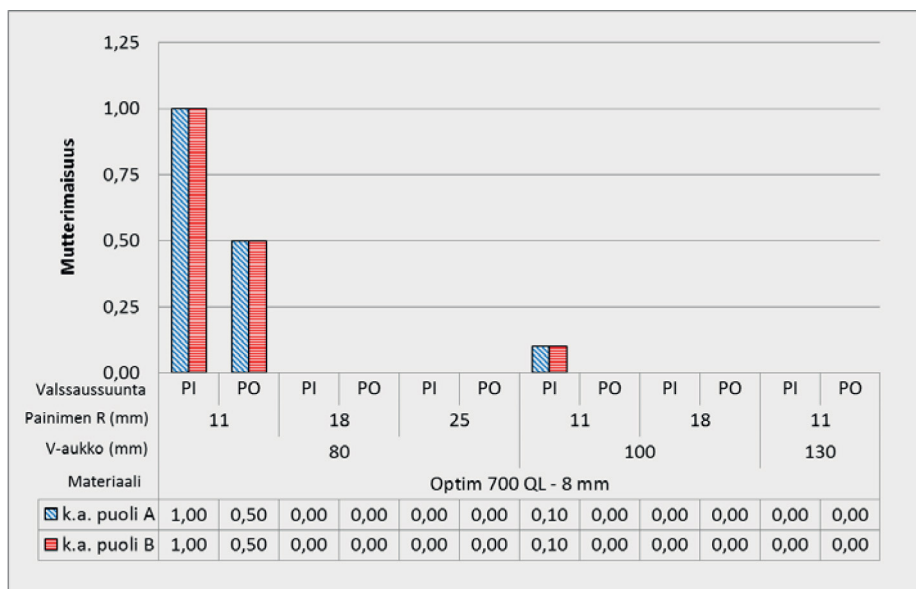
Kuvissa 33-38 on esitetty särmätyistä näytteistä silmämääräisesti mitatut mutterimaisuudet. Asteikko mutterimaisuudessa oli 0, ½ ja 1, missä 0 tarkoitti sitä, että mutterimaisuutta ei havaittu, 1 oli selvä mutterimaisuus ja ½ oli lievä mutterimaisuus. Mutterimaisuuden arvot ovat toistokokeessa saatujen tulosten keskiarvoja. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden) ja A-puoli on särmätty näytteen merkkaukspuoli ylöspäin, B-puoli merkkaukspuoli alaspäin.



Kuva 33. Mutterimaisuus 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



Kuva 34. Mutterimaisuus 10 mm Optim 700 QL teräksellä.

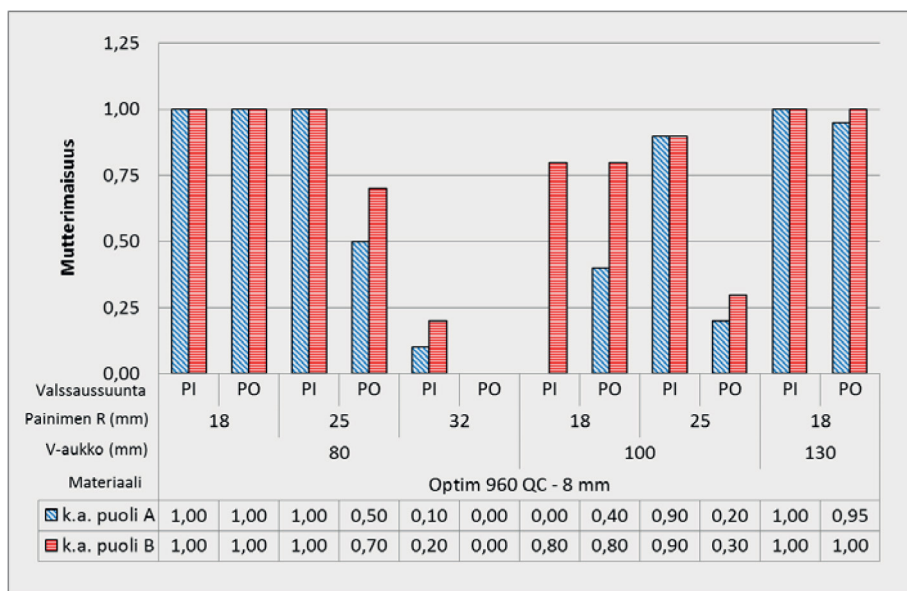


Kuva 35. Mutterimaisuus 8 mm Optim 700 QL teräksellä.

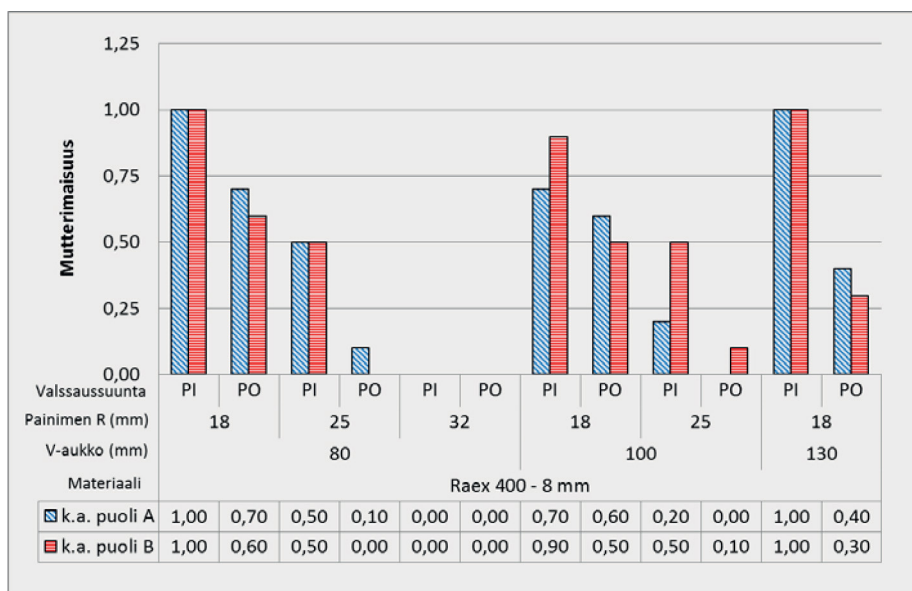
Raex 500 teräksessä ei havaittu lainkaan mutterimaisuutta tässä tutkimuksessa käytetyillä työkaluyhdistelmillä.

Mutterimaisuuden tunnistamista konenäöllä testattiin neljällä näytteellä. Näytteessä O960QC-8-PI-R18-V100 oli selvästi manuaalisesti havaittavissa oleva mutterimaisuus. Näytteessä O700MC-10-PI-R11-V80 oli lievää mutterimaisuutta. Lopuissa kahdessa näytteessä mutterimaisuutta ei ollut havaittavissa.

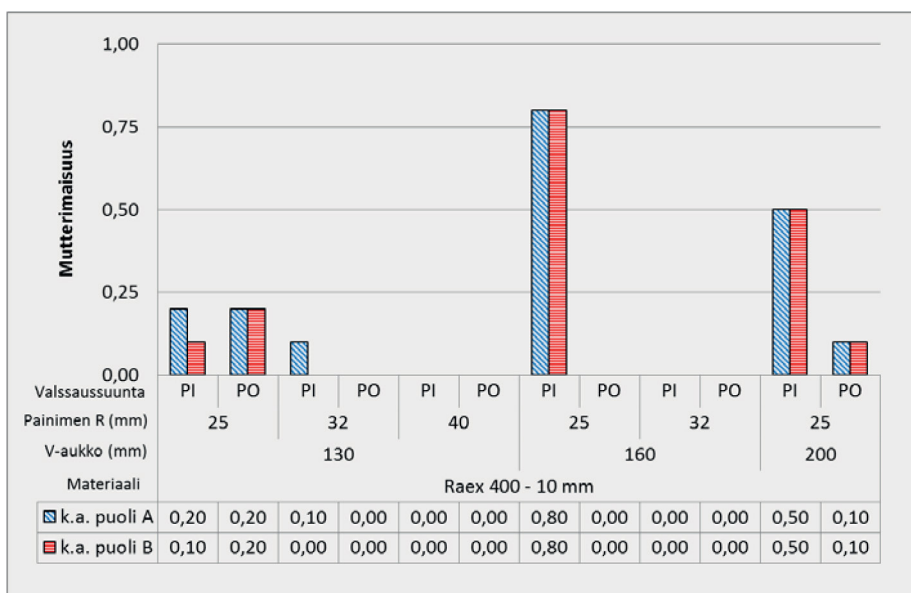
Kuvassa 39 on esitetty tulokset mutterimaisuuden mittauksista eri kohdista näytteitä. Mitä pienempi arvo on ellipsin säteiden suhteella sitä mutterimaisempi oli näyte. Ellipsin säteiden suhteita vertailemalla konenäöllä saadut tulokset näyttäisivät vastaavan manuaalisen tarkastelun tuloksia.



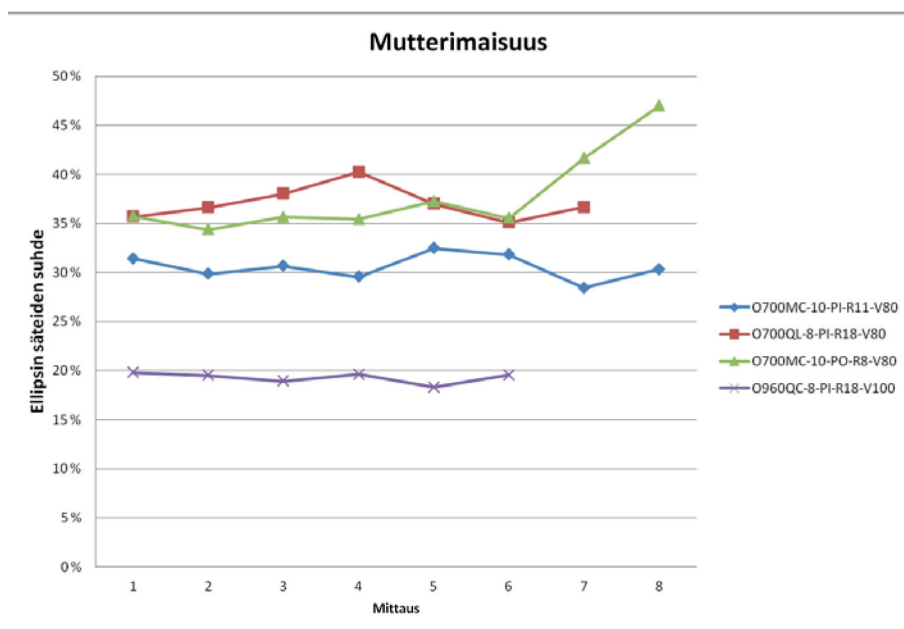
Kuva 36. Mutterimaisuus 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



Kuva 37. Mutterimaisuus 8 mm Raex 400 teräksellä.



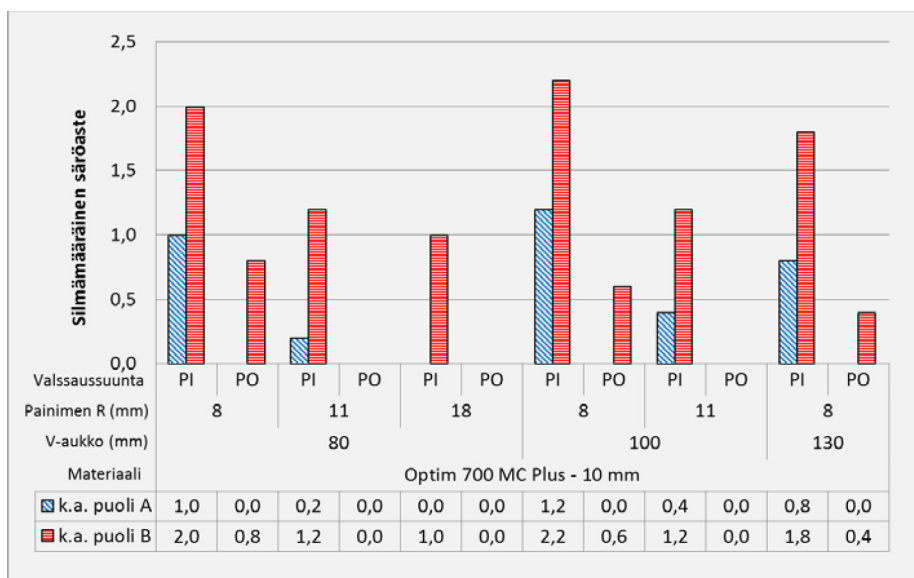
Kuva 38. Mutterimaisuus 10 mm Raex 400 teräksellä.



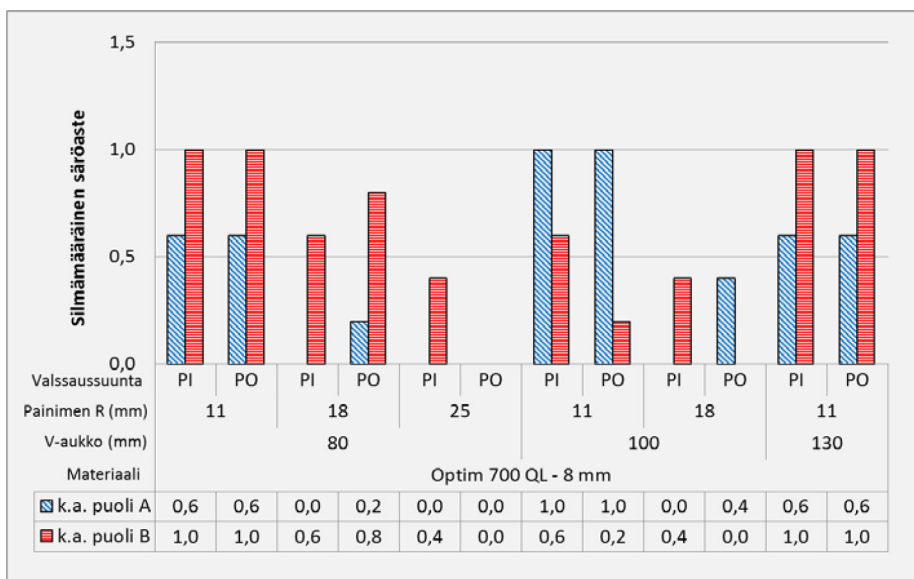
Kuva 39. Mutterimaisuudet konenäön avulla.

3.3.2 Silmämääräinen säröaste

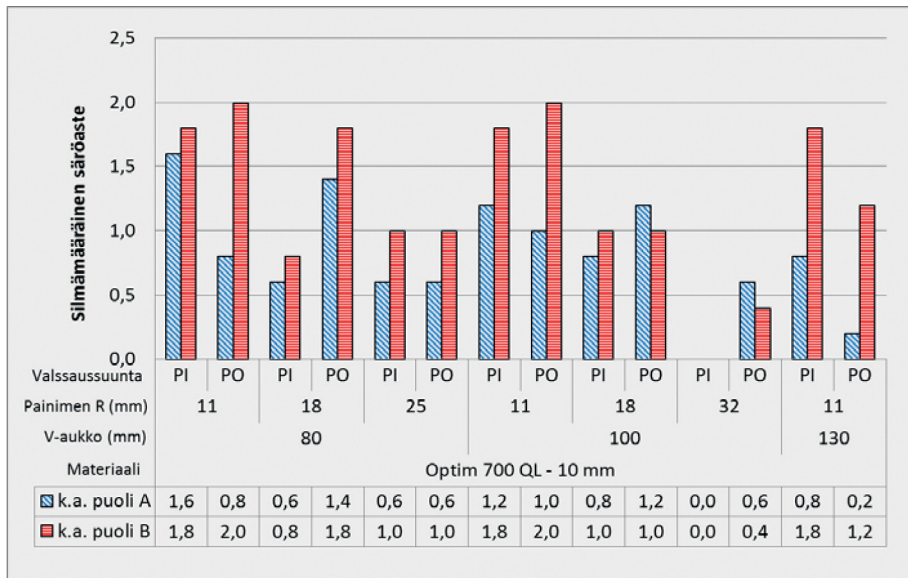
§Kuvissa 40-45 on esitetty silmämääräisesti mitattu säröaste eri materiaaleille eri työkaluyhdistelmillä. Säröasteen määrittämisessä oli käytössä asteikko 0, 1, 2, 3. Säröasteet ovat toistokokeessa saatujen tulosten keskiarvoja. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden) ja A-puoli on särmäty näyttö-merkkäuspuoli ylöspäin, B-puoli merkkäuspuoli alaspäin.



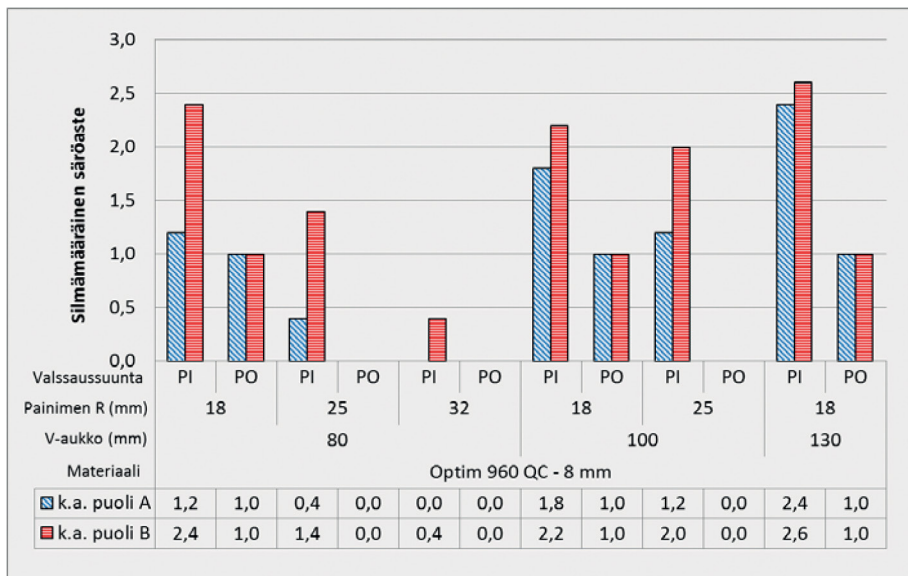
Kuva 40. Silmämääräinen säröaste 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



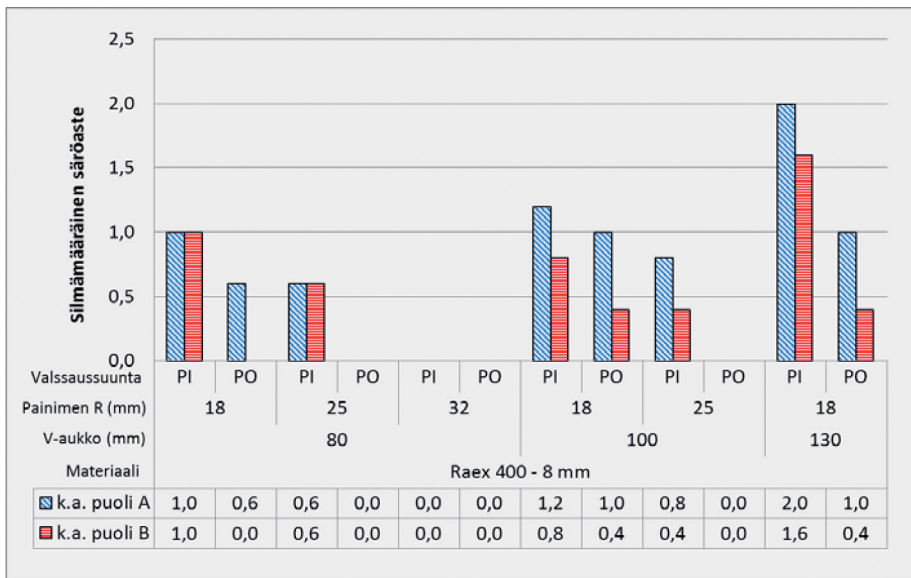
Kuva 41. Silmämääräinen säröaste 8 mm Optim 700 QL teräksellä.



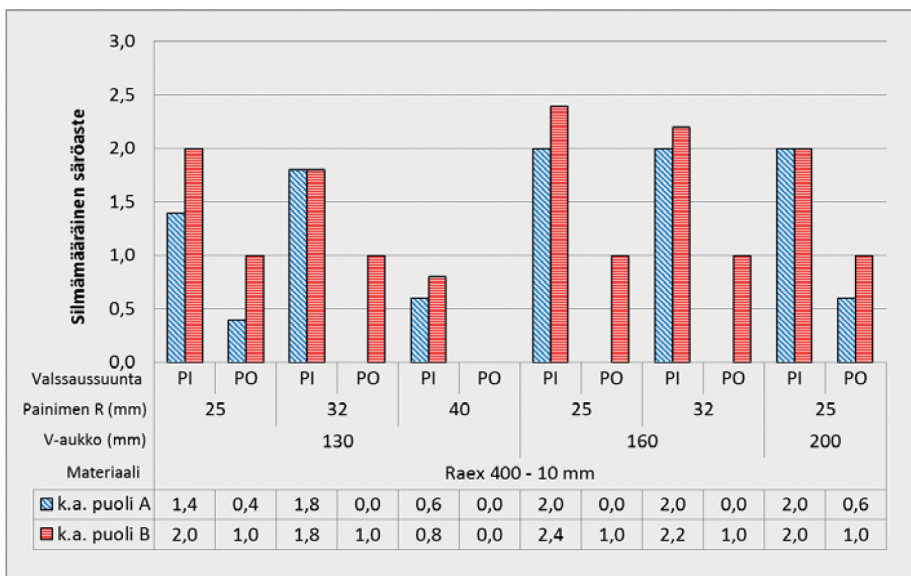
Kuva 42. Silmämääräinen säröaste 10 mm Optim 700 QL teräksellä.



Kuva 43. Silmämääräinen säröaste 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



Kuva 44. Silmämääräinen säröaste 8 mm Raex 400 teräksellä.



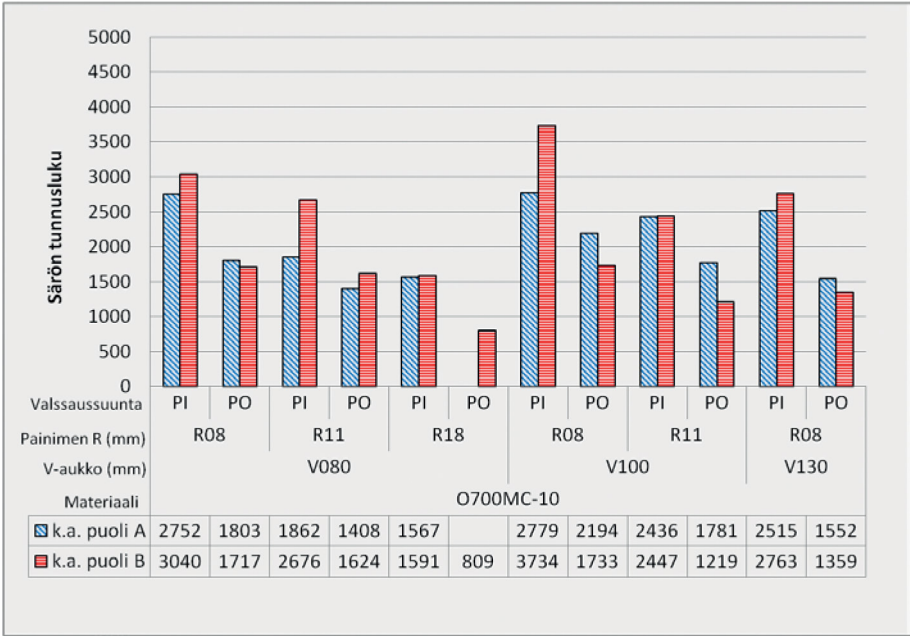
Kuva 45. Silmämääräinen säröaste 10 mm Raex 400 teräksellä.

Raex 500 teräksessä ei havaittu lainkaan säröjä tässä tutkimuksessa käytetyillä työkaluyhdistelmillä.

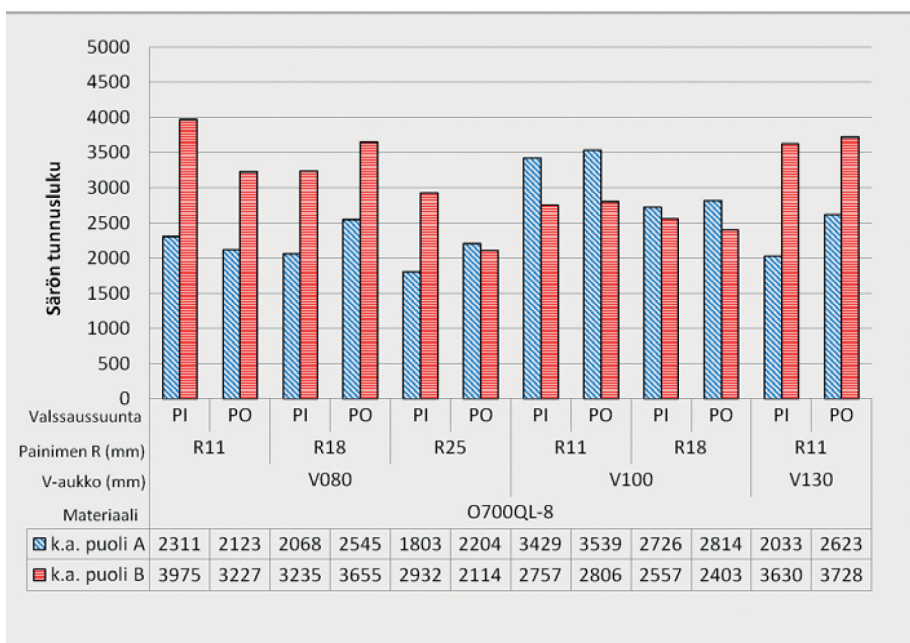
3.3.3. Konenäköön perustuva säröaste

Kuvissa 46-51 on esitetty konenäöllä saatujen säröastemittausten tulokset. Lukuja ei voi muuttaa suoraan silmämääräisen tarkastelun tuloksia vastaaviksi, koska tietyillä materiaaleilla on pinnassa harmaasävyvaihteluja, jotka häiritsevät menetelmää. Kun pinta on harmaasävyltään tasainen, näyttäisi menetelmällä löydetävän vastaavuus silmämääräiselle tarkastelulle, josta enemmän tulosten tarkastelussa. Särön tunnusluvut ovat toistokokeessa saatujen tulosten keskiarvoja. Särmäyskokeen suunta suhteessa valssaussuuntaan on erotettu toisistaan (PI = taivutuslinja valssaussuunnassa, PO = taivutuslinja poikittain valssaussuuntaan nähden) ja A-puoli on särmäty näytteen merkkauspaneeli ylöspäin, B-puoli merkkauspaneeli alaspäin. Joitakin painimen ja V-aukon yhdistelmiä ei kuvattu säröytymistestauksessa, koska niistä oli silmämääräisesti havaittavissa ettei säröjä esiinny. Tulostuloksissa nämä esiintyvät tyhjinä kohtina.

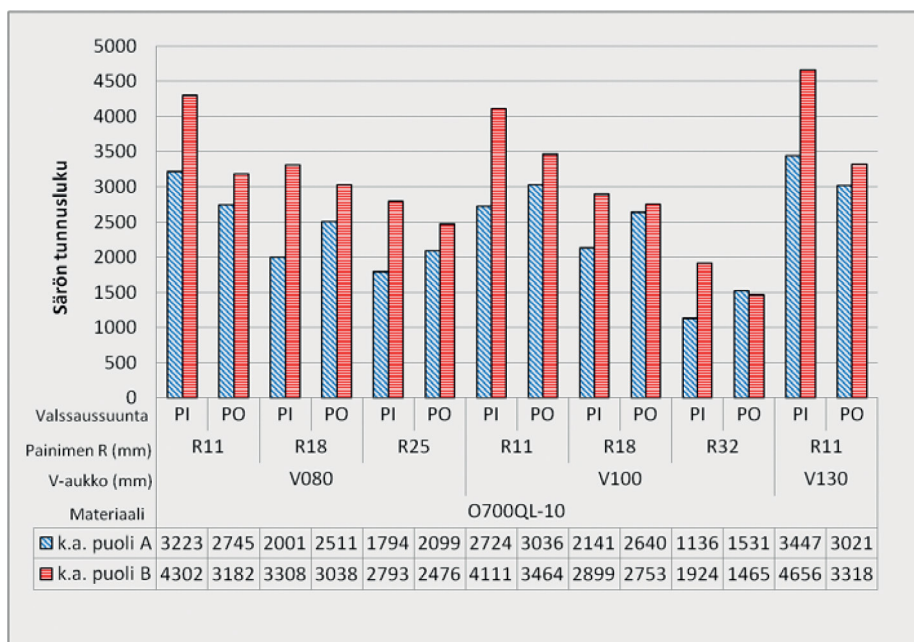
3.4 SÄRMÄN POIKKILEIKKAUKSEN TARKASTELUT



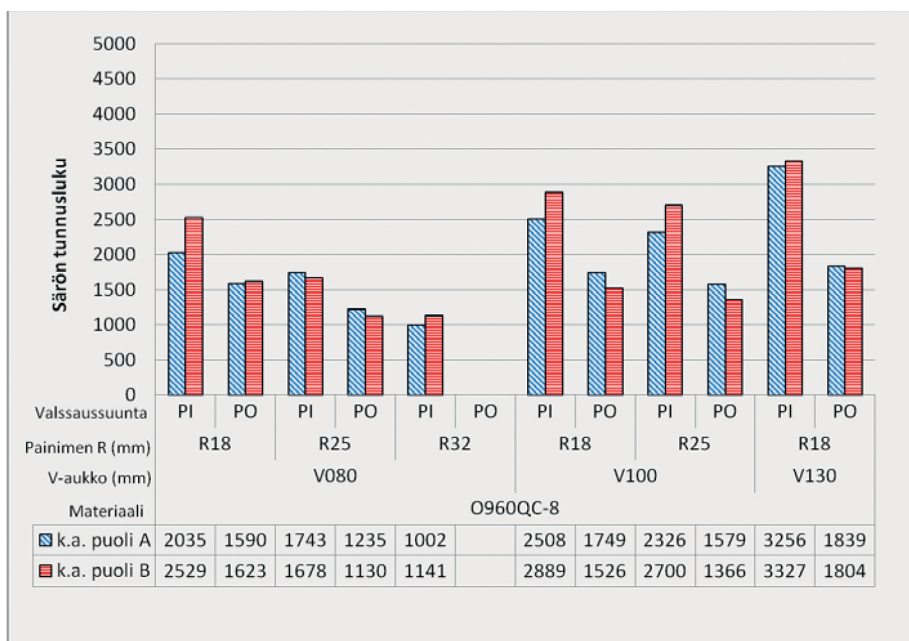
Kuva 46. Säröaste konenäöllä 10 mm Optim 700 MC Plus teräksellä.



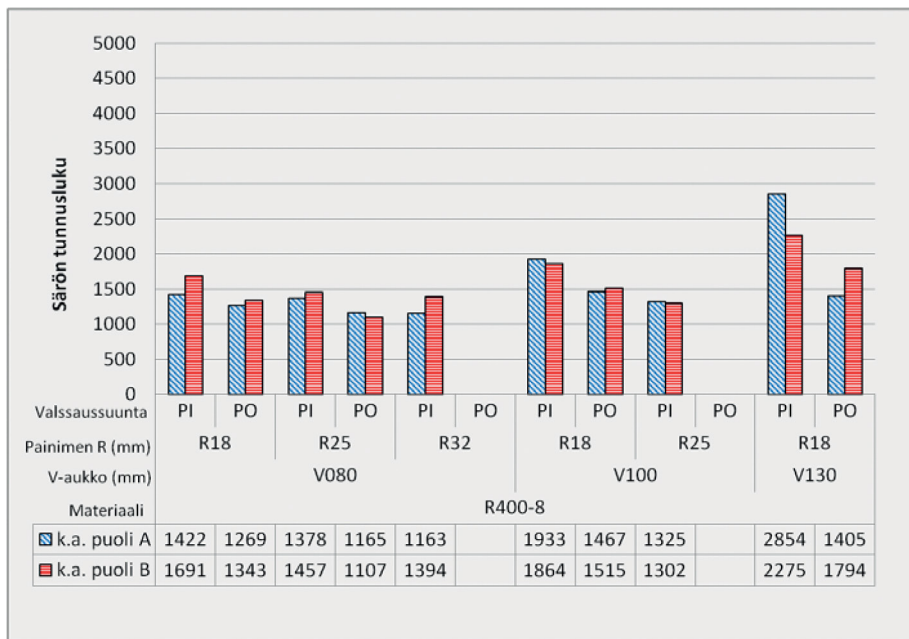
Kuva 47. Säröaste konenäöllä 8 mm Optim 700 QL teräksellä.



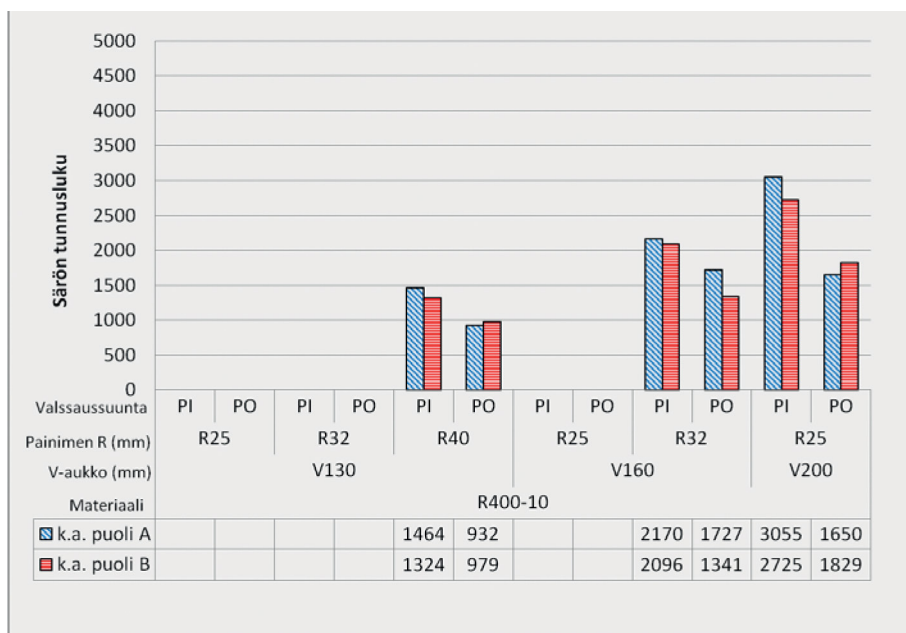
Kuva 48. Säröaste konenäöllä 10 mm Optim 700 QL teräksellä.



Kuva 49. Säröaste konenäöllä 8 mm Optim 960 QC teräksellä.



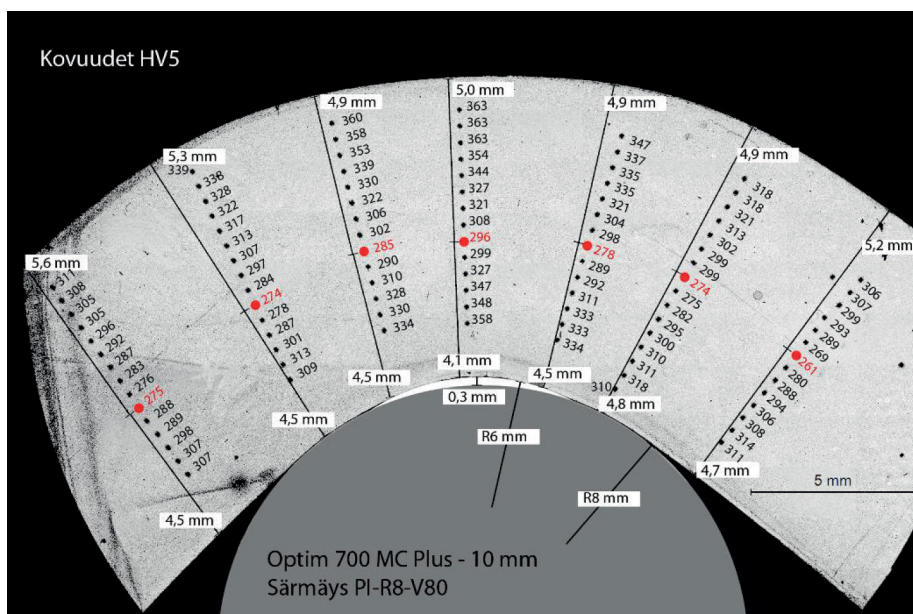
Kuva 50. Säröaste konenäöllä 8 mm Raex 400 teräksellä.



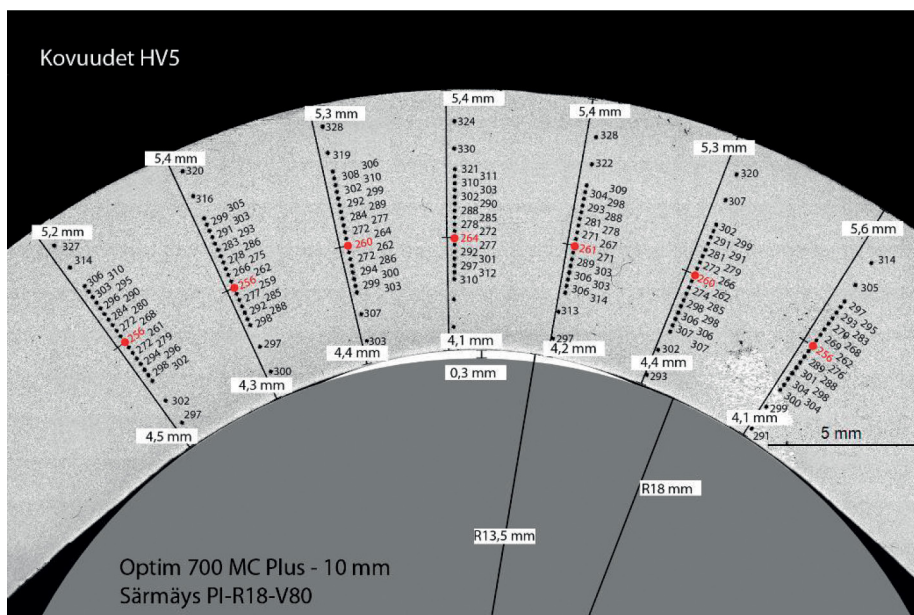
Kuva 51. Säröaste konenäöllä 10 mm Raex 400 teräksellä.

3.4.1 Kovuusmittaukset sekä paksuudet ja sisäsäteet

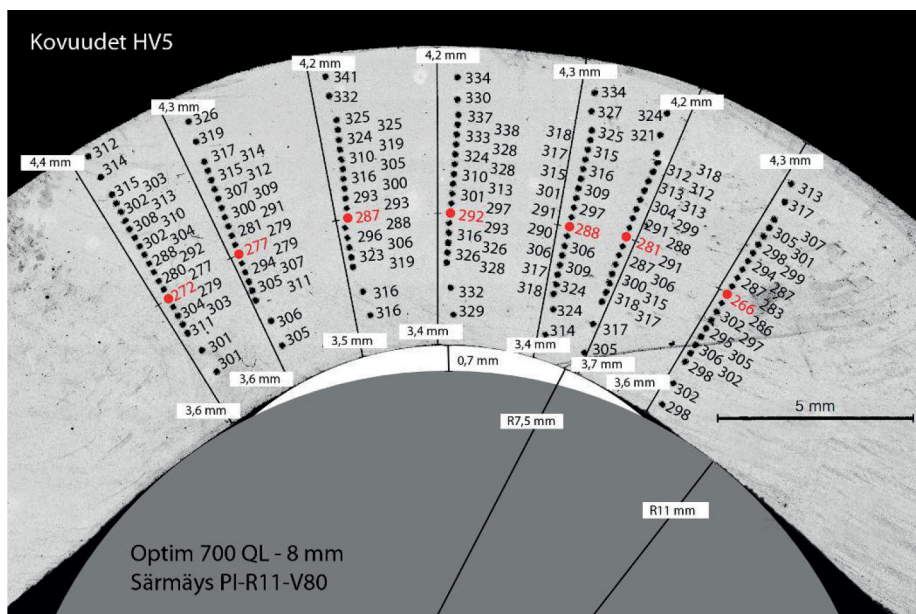
Kuvissa 52-63 on esitetty särmätyjen näytteiden poikkileikkauksista tehdyistä hieistä otetut kuvat ja kovuusmittausten sekä sisäsäteiden mittausten tulokset. Tutkittavat näytteet valittiin kustakin materiaalista siten, että mukana on kaikkein pienin ja kaikkein suurin taivutussäde V-aukon mitan ollessa sama. Kuviin on merkitty kovuusmittauksen tulokset ja minimikovuus on merkitty punaisella. Lisäksi kuviin on merkitty minimikovuuspisteen etäisyys ulkopinnasta ja sisäpinnasta. Työkalun säde on merkitty harmaalla ympyrällä ja pienin sisäsäde valkoisella ympyrällä. Lisäksi levyn irtoama on merkitty kuvaan. Sisäsäteitä mitattiin myös sädetulkilla ja näiden mittausten tulokset yhdessä mikroskooppitarkasteluissa mitattujen sisäsäteiden kanssa on esitetty taulukossa 5. Kohdassa 3.4.2 on esitetty mikrorakennekuvia särmi- en ulko- ja sisäpinnoilta.



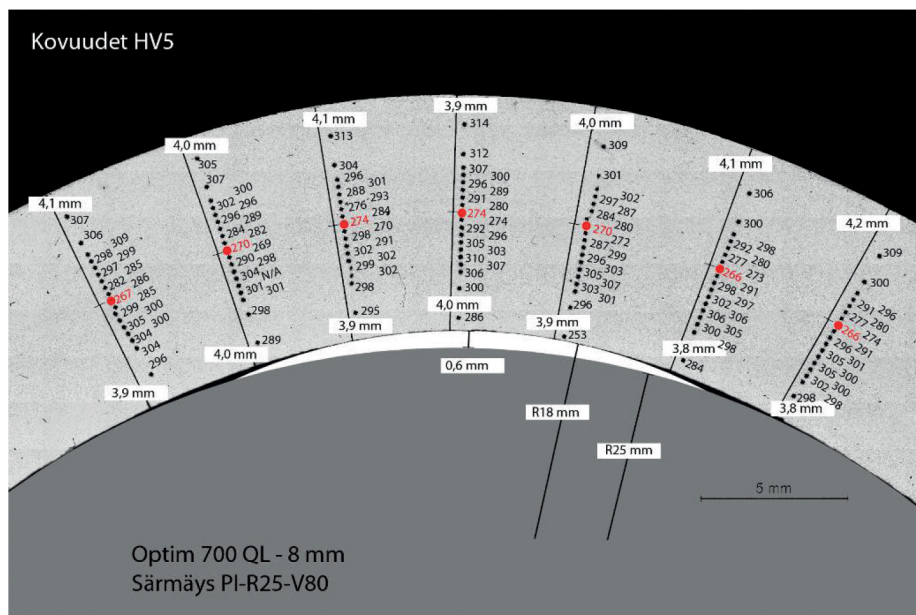
Kuva 52. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 MC Plus, särmäys PI-R8-V80.



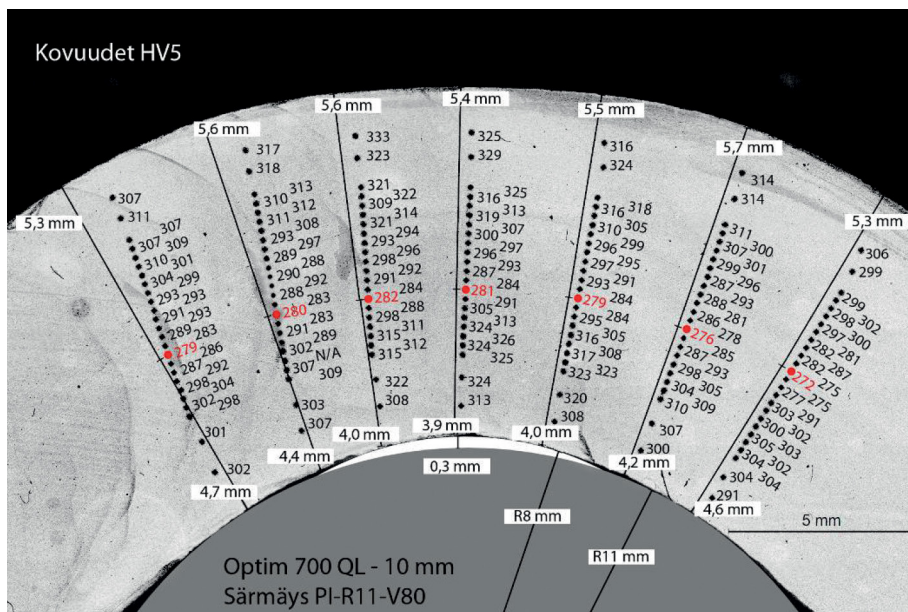
Kuva 53. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 MC Plus, särmäys PI-R18-V80.



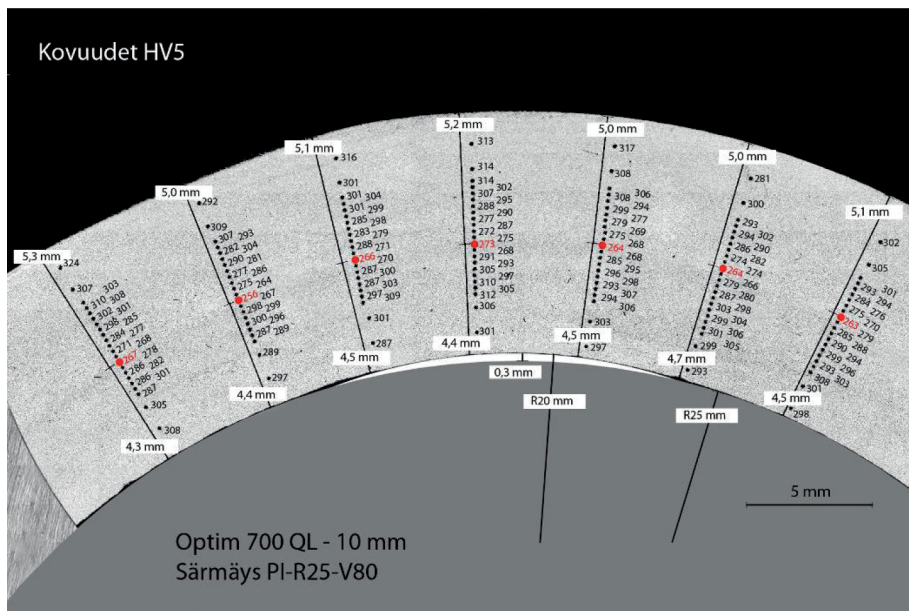
Kuva 54. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R11-V80.



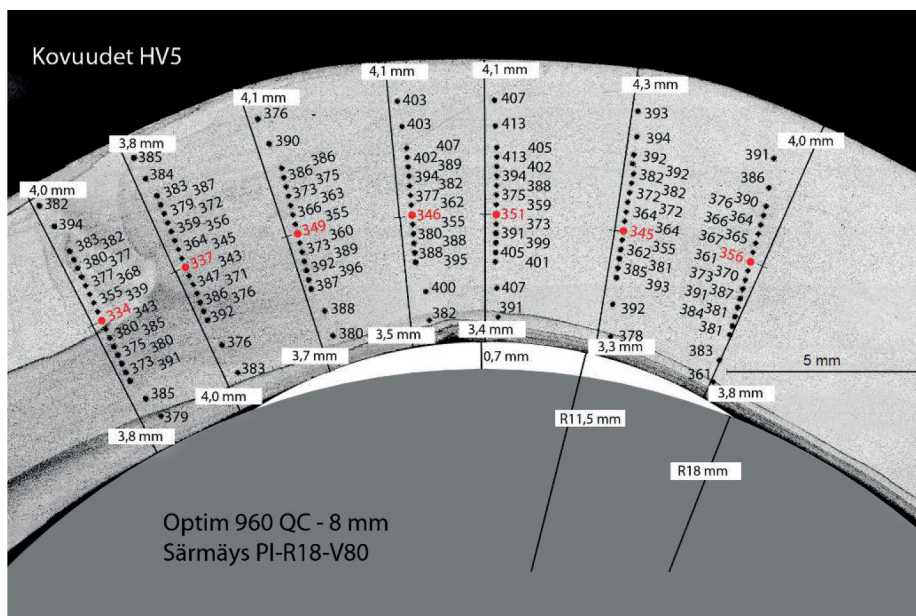
Kuva 55. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R25-V80.



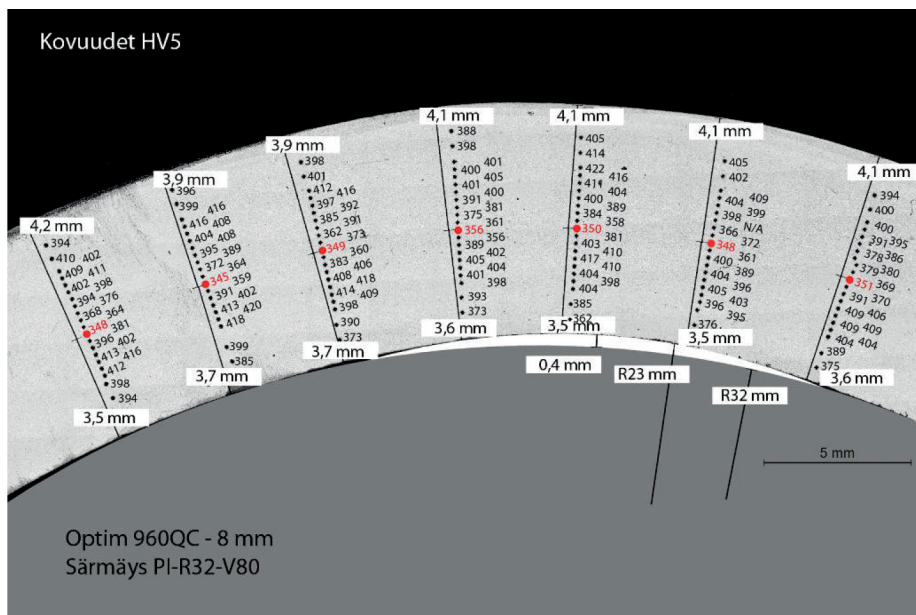
Kuva 56. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R11-V80.



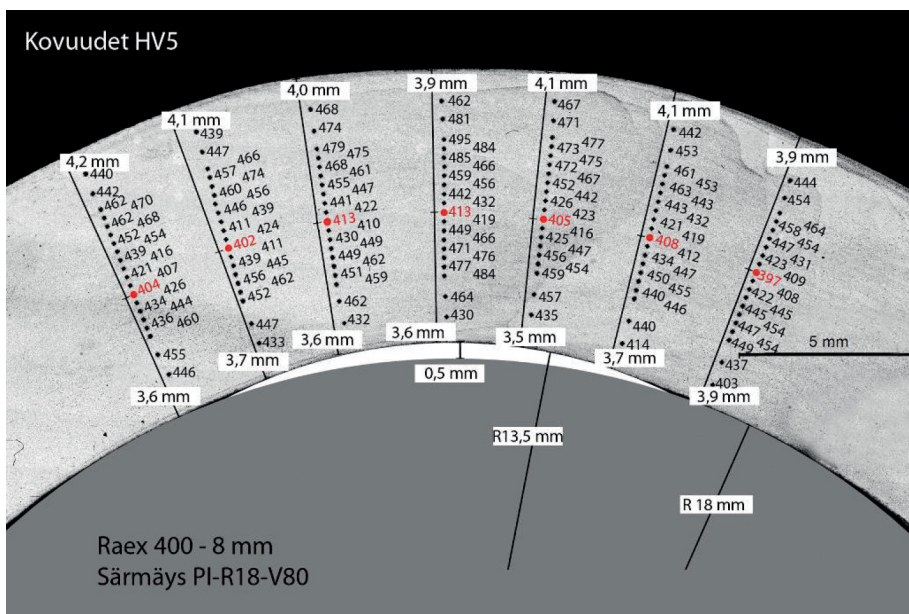
Kuva 57. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R25-V80.



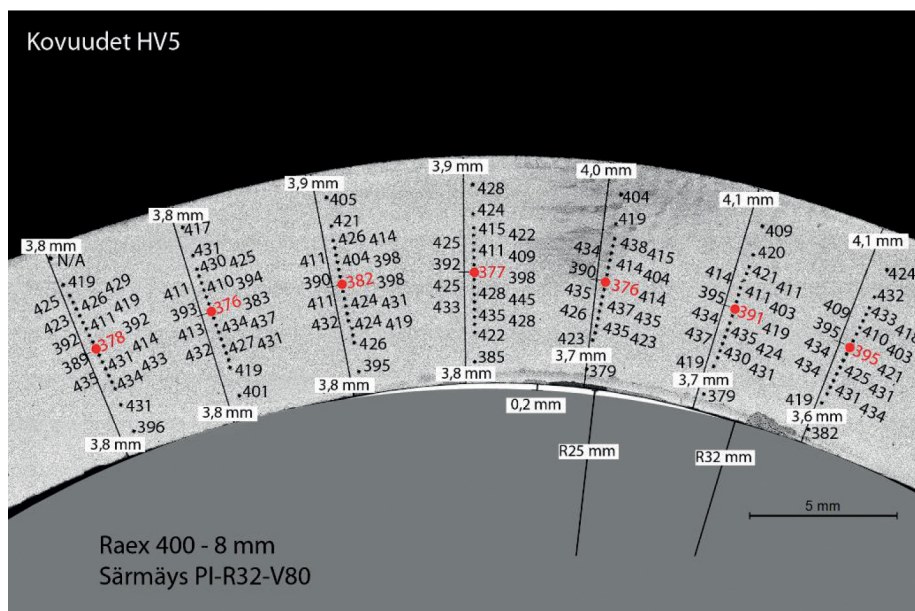
Kuva 58. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Optim 960 QC, särmäys PI-R18-V80.



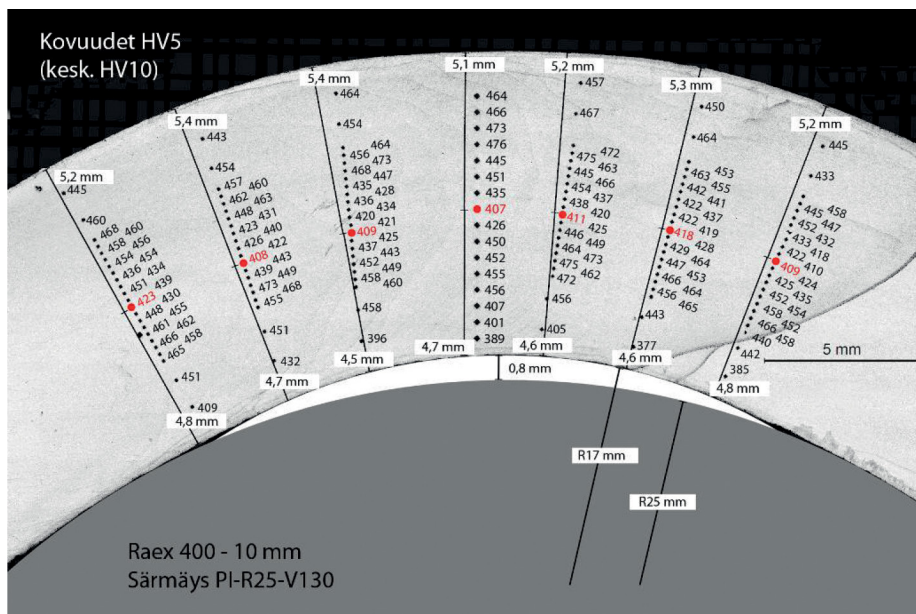
Kuva 59. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Optim 960 QC, särmäys PI-R32-V80.



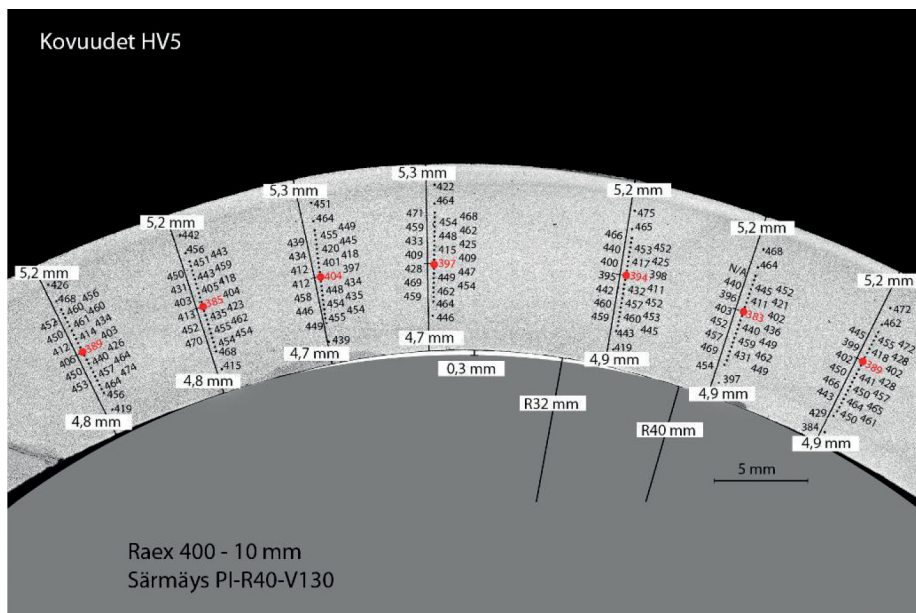
Kuva 60. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Raex 400, särmäys PI-R18-V80.



Kuva 61. Särmän poikkileikkaus, 8 mm Raex 400, särmäys PI-R32-V80.



Kuva 62. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Raex 400, särmäys PI-R25-V130.

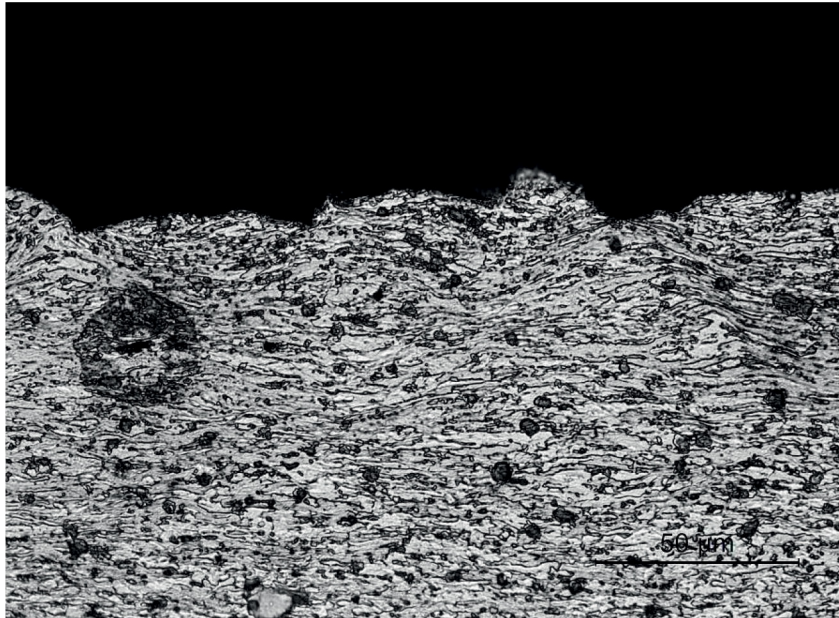


Kuva 63. Särmän poikkileikkaus, 10 mm Raex 400, särmäys PI-R40-V130.

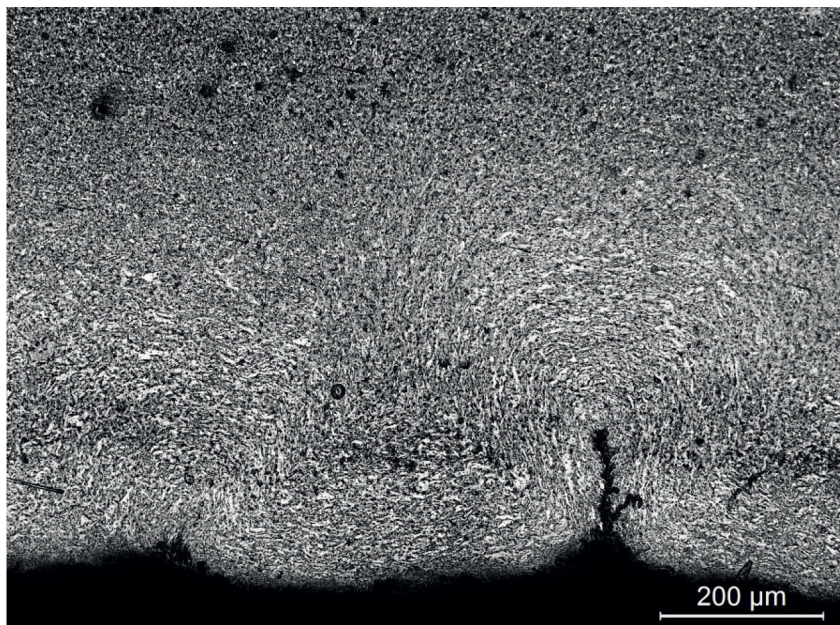
Taulukko 5. Särmistä mitatut minimisisäsäteet.

Materiaali	V.S.	V	R	Min. sisäsäde (mm)	
				Sädetulkki	Mikrosk.
Optim 700 MC Plus - 10 mm	PI	80	8	6,0	6
	PI	80	8	6,0	
	PO	80	8	6,0	
	PO	80	8	6,0	
	PI	80	11	8,5	
	PI	80	11	8,5	
	PI	80	18		13,5
Optim 700 QL - 8 mm	PI	80	11	8,0	7,5
	PI	80	11	8,0	
	PO	80	11	8,0	
	PO	80	11	8,0	
	PI	80	18	14,5	
	PI	80	18	14,5	
	PI	80	25		18
Optim 700 QL - 10 mm	PI	80	11	9,5	8
	PI	80	11	9,5	
	PO	80	11	10,0	
	PO	80	11	9,5	
	PI	80	18	17,0	
	PI	80	18	17,5	
	PI	80	25		20
Optim 960 QC - 8 mm	PI	80	18	11,5	11,5
	PI	80	18	14,0	
	PO	80	18	13,5	
	PO	80	18	14,5	
	PI	80	25	17,5	
	PI	80	25	19,0	
	PI	80	32		23
Raex 400 - 8 mm	PI	80	18	16,0	13,5
	PI	80	18	16,0	
	PO	80	18	16,0	
	PO	80	18	16,5	
	PI	80	25	20,0	
	PI	80	25	22,0	
	PI	80	32		25
Raex 400 - 10 mm	PI	130	25	18,0	17
	PI	130	25	20,0	
	PO	130	25	19,0	
	PO	130	25	21,0	
	PI	130	32	27,0	
	PI	130	32	30,0	
	PI	130	40		32

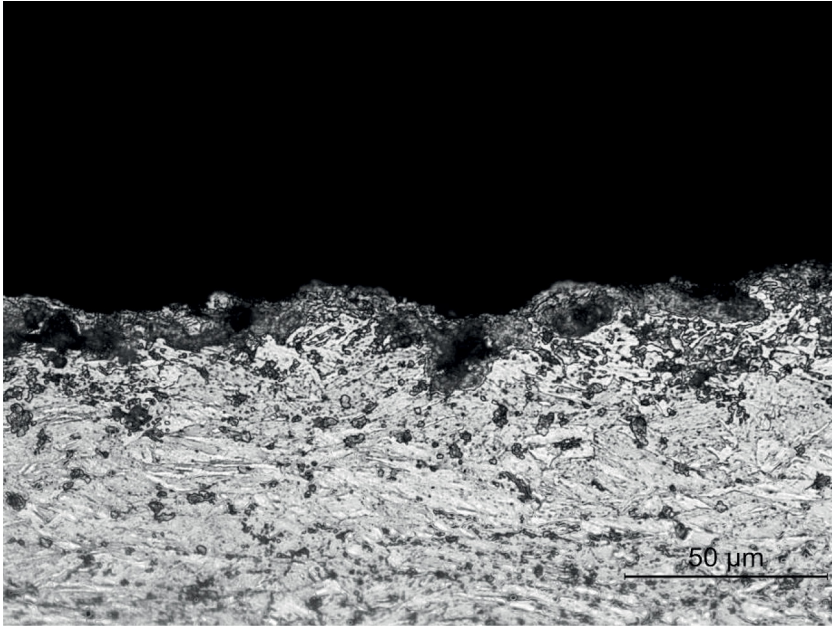
3.4.2 Mikrorakenteet



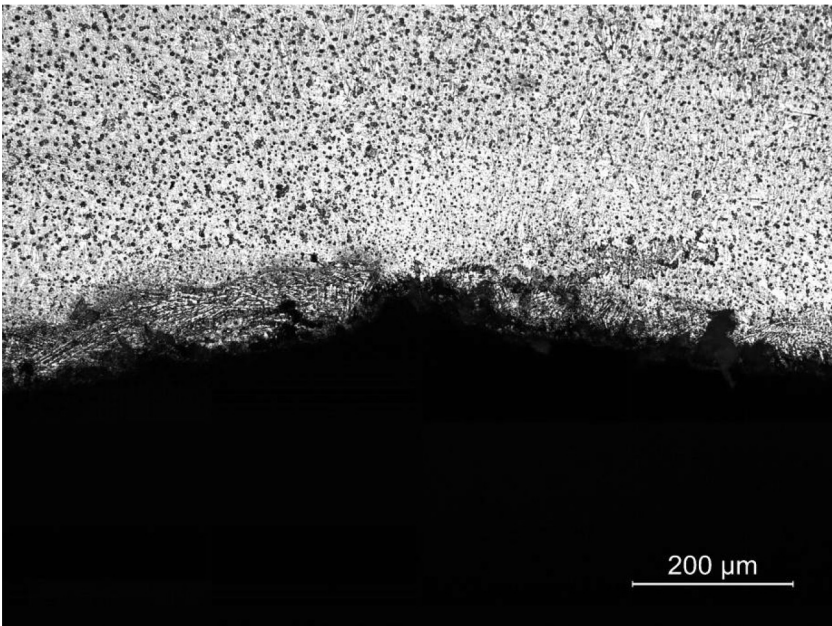
Kuva 64. Särmän ulkopinnan poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 MC Plus, särmäys PI-R8-V80, suurennos 500x.



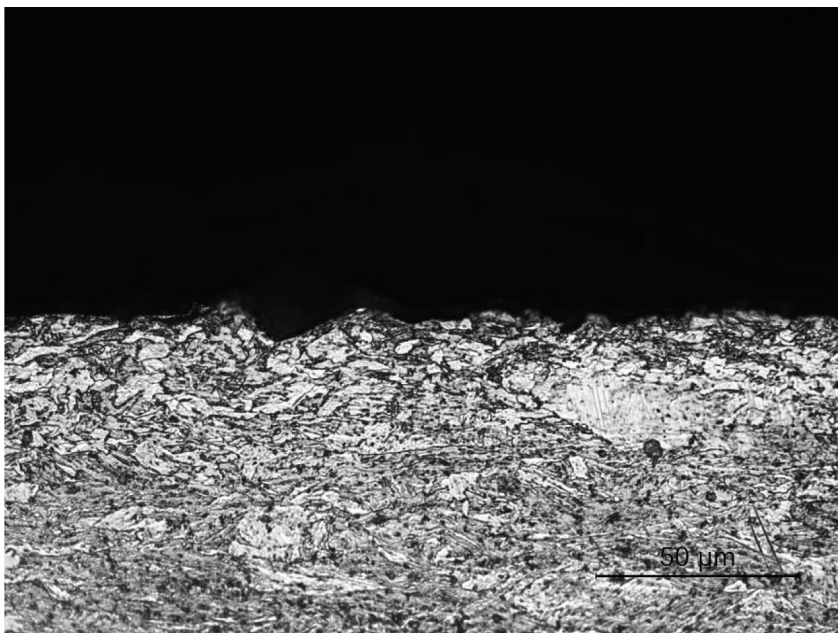
Kuva 65. Särmän sisäpinnan poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 MC Plus, särmäys PI-R8-V80, suurennos 100x.



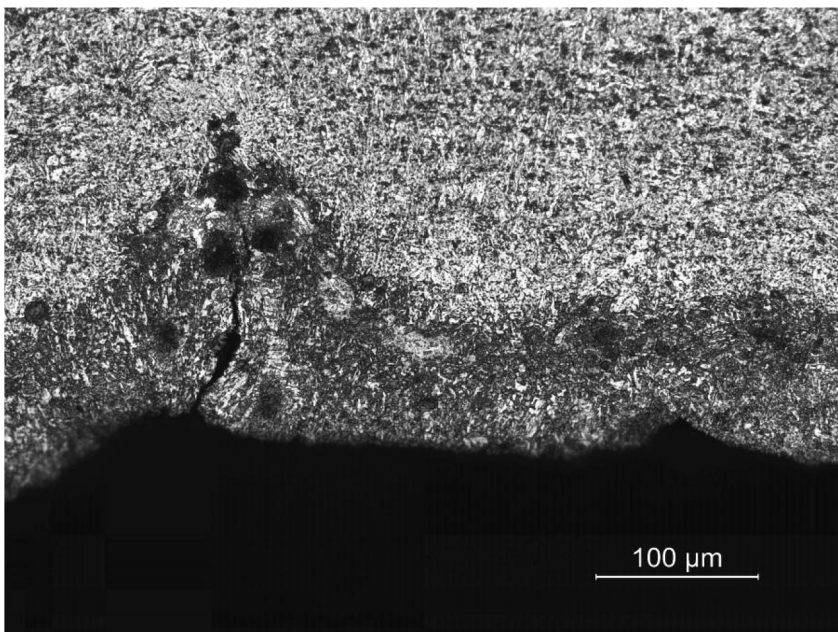
Kuva 66. Särmän ulkopinnan poikkileikkaus, 8 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R11-V80, suurennos 500x.



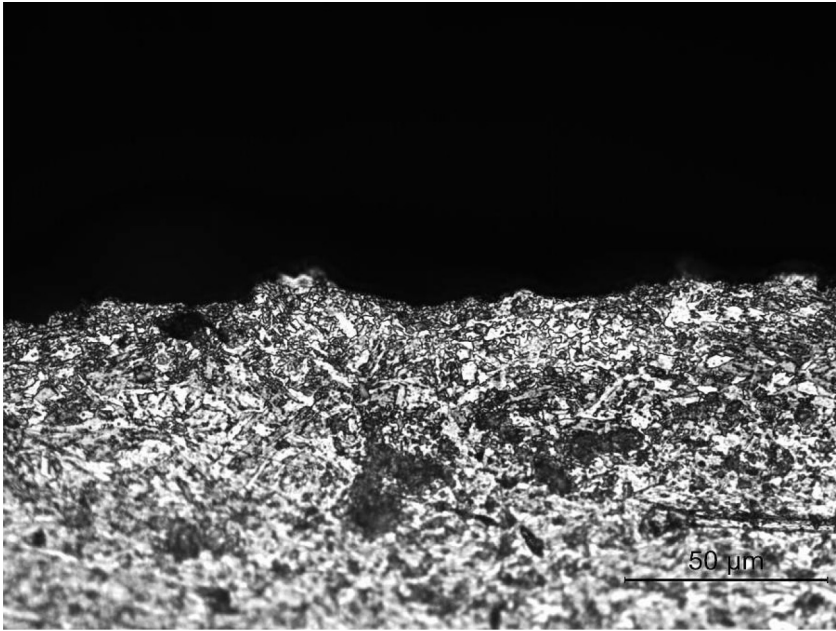
Kuva 67. Särmän sisäpinnan poikkileikkaus, 10 mm Optim 700 QL, särmäys PI-R11-V80, suurennos 100x.



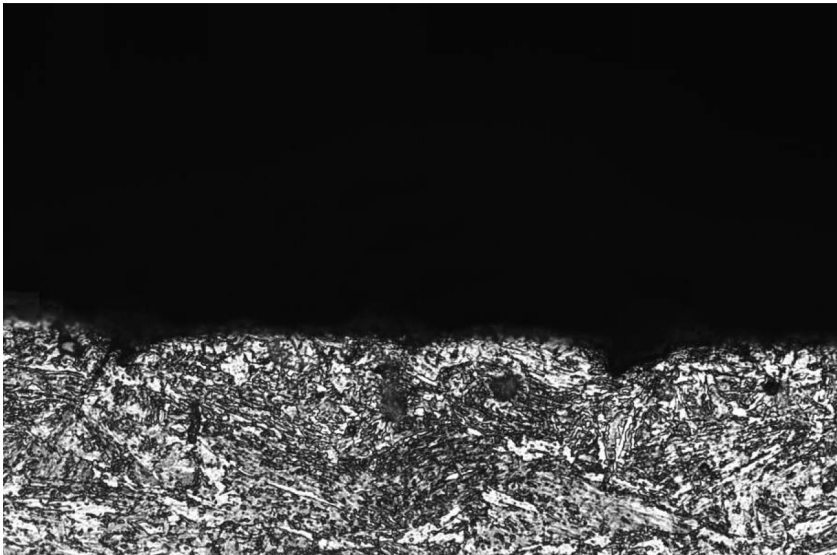
Kuva 68. Särmän ulkopinnan poikkileikkaus, 8 mm Optim 960 QC, särmäys PI-R18-V80, suurennos 500x.



Kuva 69. Särmän sisäpinnan poikkileikkaus, 8 mm Optim 960 QC, särmäys PI-R18-V80, suurennos 500x.



Kuva 70. Särmän ulkopinnan poikkileikkaus, 8 mm Raex 400, särmäys PI-R18-V80, suurennos 500x.



Kuva 71. Särmän ulkopinnan poikkileikkaus. 10 mm Raex 400, särmäys PI-R25-V130, suurennos 500x.

4 Tulosten tarkastelu

4.1 TAIVUTUSVOIMAT

Maksimivoimat eri materiaaleille on esitetty kuvissa 12-18. Kuvissa nähdään, että painimen ja vastimen mitta vaikuttaa eniten maksimi voimaan; Painimen säteen kasvaessa ja V-aukon leveyden pienentyessä maksimi voima kasvaa. Valssaussuunnalla näyttää olevan Optim 700 MC Plus:n kohdalla jonkin verran vaikutusta. Valssaussuuntaan nähden pitkittäin särmättäessä (taivutuslinja valssaussuuntaan) maksimivoimat ovat suuremmat. Tämä johtuu siitä, että kyseisellä teräksellä poikittaissuuntainen vetomurtolujuus on selvästi suurempi kuin pitkittäissuuntainen vetomurtolujuus, kuten taulukosta 2b nähdään. Muilla teräksillä ero särmäysvoimissa valssaussuuntien välillä on pieni kuten myös ero vetomurtolujuuksissa pitkittäin ja poikittain valssaussuuntaan nähden. A ja B puolen (A=särmäys tehty merkkauspannä ylöspäin, B merkkauspannä alaspäin) välillä ei näyttäisi millään teräksellä olevan kovin suurta eroa, joskin näyttäisi, että useimmiten B-puolella särmättäessä maksimivoima on hieman pienempi. Ero johtunee jäähdytyksen erilaisuudesta teräksen ylä- ja alapinnalla kuumavalssaussuuntiosuissa.

Taivutusvoimien laskemiseksi on kehitetty erilaisia kaavoja, joiden avulla voidaan ennustaa tarvittavaa maksimitaivutusvoimaa. Tällaisia ovat esim. kaavat 1-4 [8-10].

$$F = 1,5 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} \quad (\text{Ruukki}) \quad (1)$$

$$F = \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} \quad (W/t \geq 10) \quad (\text{Schuler}) \quad (2a)$$

$$F = \left(1 + \frac{4 \times t}{W}\right) \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} (W/t < 10) \quad (\text{Schuler}) \quad (2b)$$

$$F = 1,33 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W - (2 \times \cos 45^\circ \times R_p)} \text{ [N]} \quad (\text{Trumpf}) \quad (3)$$

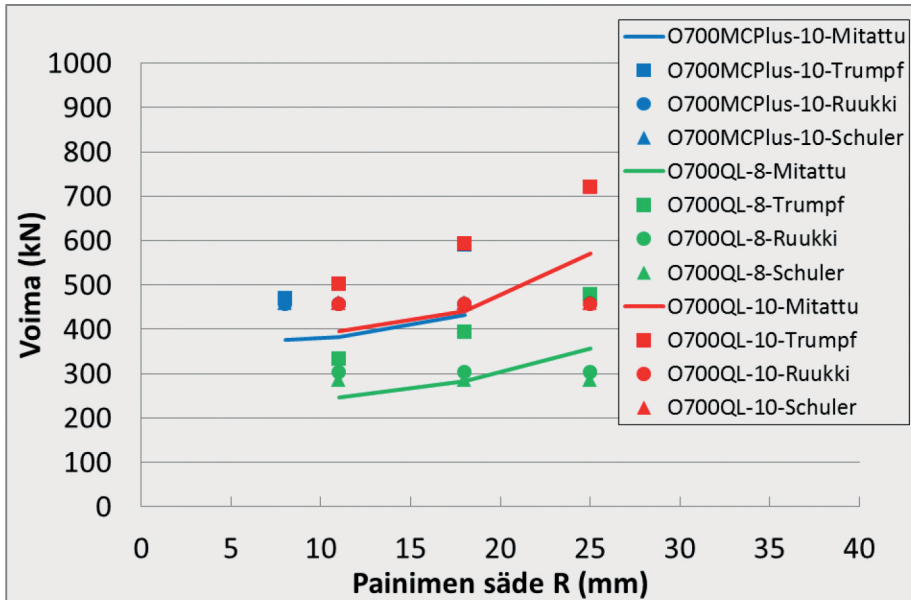
$$F = 1,6 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W} \text{ [N]} \quad (\text{SSAB}) \quad (4)$$

Missä: F on maksimi taivutusvoima
 R_m on vetomurtolujuus (N/mm²)
 b on taivutuspituus (mm)
 t on levyn paksuus (mm)
 W on V-aukon leveys (mm)
 R_p on painimen säde (mm) (kaava 3)

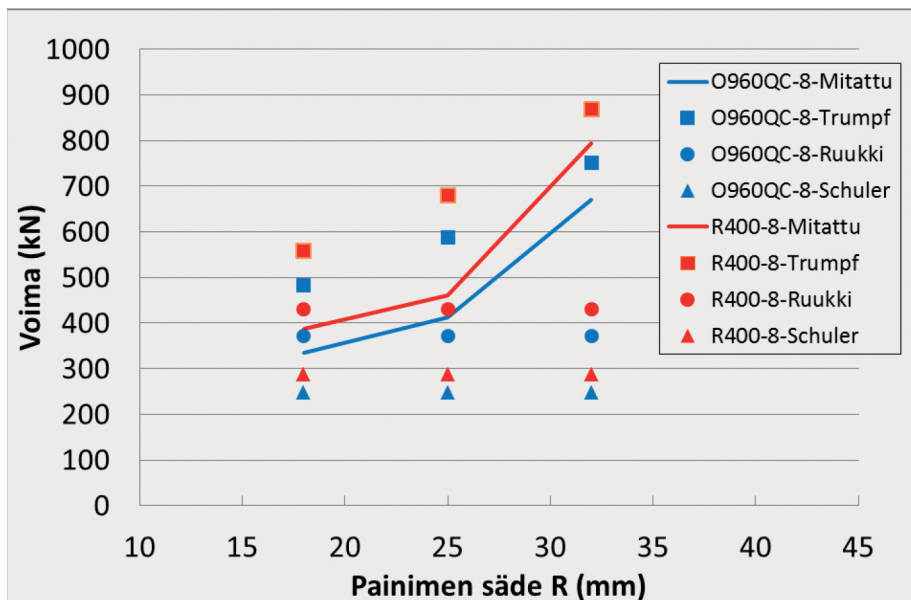
Kaavat 1-3 olettavat, että painimen aiheuttama kuormitus on pistemäinen eikä näin ollen huomioi lainkaan painimen sädettä, joka vaikuttaa tarvittavaan voimaan. Painimen säteen kasvaessa vipuvarsi painimen ja V-aukon reunan välillä pienenee ja näin ollen voimaa tarvitaan enemmän. Kaava 3 ottaa huomioon myös painimen säteen, jonka kasvaessa kaavan ennustama voima kasvaa. Kuvissa 71-74 on esitetty painimen säteen vaikutus mitattuun maksimivoimaan sekä kaavoilla 1,2 ja 3 laskettuun voimaan. Kaava 4 on lähes identtinen kaavan 1 kanssa (kerroin 1,6), joten se on jätetty pois tarkastelusta. Voimien laskennassa käytetyt murtolujuuden arvot on saatu vetokokeiden tuloksista ja niissä on myös huomioitu valssaussuunnan vaikutus.

Kuvassa 71 on tarkasteltu painimen säteen vaikutusta 10 mm:n Optim 700 MC Plus ja Optim 700 QL (8 ja 10 mm) terästen särmäyksessä mitattuun ja laskettuun maksimivoimaan. Nähdään, että pienillä säteillä kaikki kaavat antavat suuremman voiman kuin mitattu, mutta säteen kasvaessa kaavojen 1 ja 2 antamat voimat jäävät pienemmiksi kuin mitattu voima. Kaava 3 näyttää antavan kaikilla säteillä liian suuren maksimivoiman. Kuvassa 72 on tarkasteltu painimen säteen vaikutusta 8 mm:n Optim 960 QC ja Raex 400 terästen särmäyksessä mitattuun ja laskettuun maksimivoimaan. Nähdään, että kaikkein pienimmällä säteellä mitattu voima on kaavojen 1 ja 2 ennustamien voimien välissä, mutta säteen kasvaessa mitattu voima alkaa lähestyä kaavan 3 arvoa. Tämä johtuu siitä, että painimen säteen suhde vastimen leveyteen alkaa kasvaa. Kaava 3 näyttää toimivan parhaiten koska se ottaa huomioon myös painimen säteen, joka tässä tapauksessa on suhteellisen suuri V-aukon leveyteen verrattuna (32 mm:n painimen säde ja 80 mm:n V-aukko). Kuvissa 73 ja 74 on tarkasteltu 10 mm:n

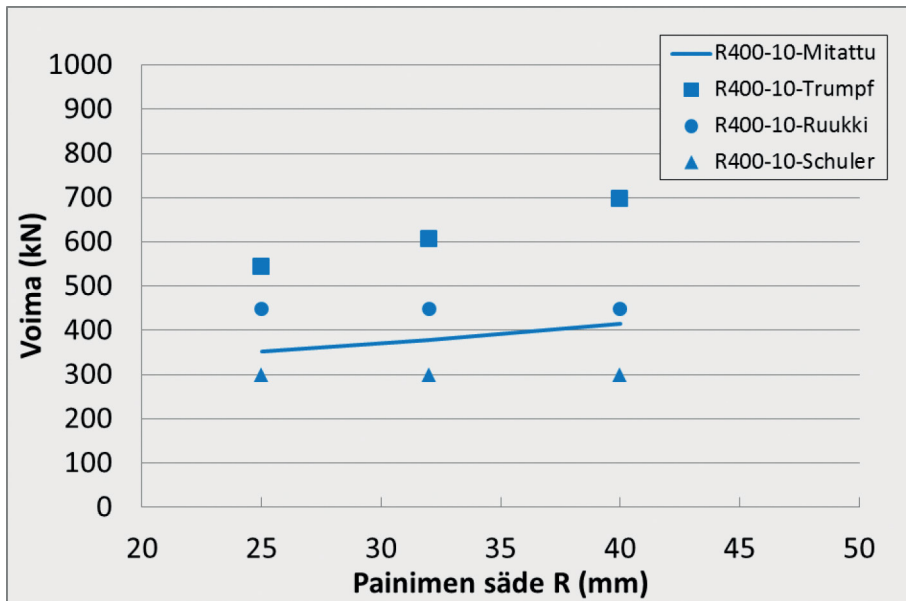
Raex 400 ja Raex 500 terästen särmäysvoimia kun V-aukko on 130 ja 200 mm. Nähdään, että mitattu voima kasvaa hieman painimen säteen kasvaessa, mutta pysyy kuitenkin kaavojen 1 ja 2 välissä. Kaava 3 näyttäisi antavan selvästi liian suuren voiman verrattuna mitattuihin voimiin.



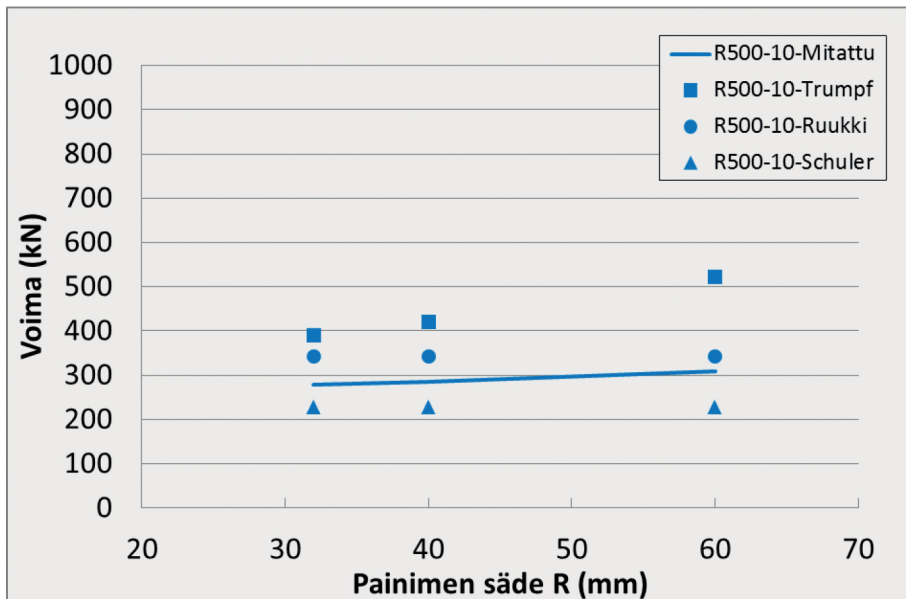
Kuva 71. Mitattu ja laskettu maksimivoima 10 mm Optim 700 MC Plus ja 8 ja 10 mm:n Optim 700 QL teräksillä, särmäys PI-V80.



Kuva 72. Mitattu ja laskettu maksimivoimaan 8 mm Optim 960 QC ja Raex 400 teräksillä, särmäys PI-V80.

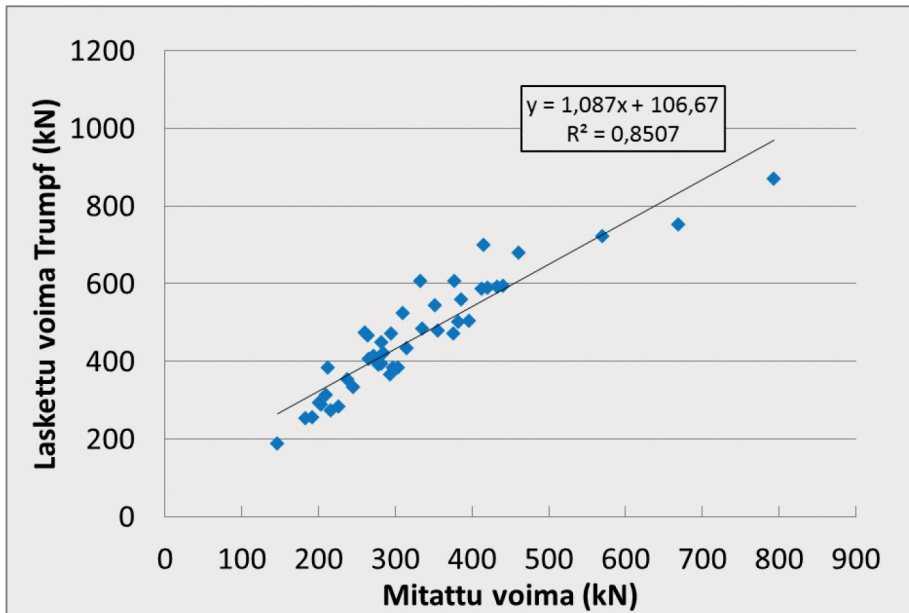


Kuva 73. Mitattu ja laskettu maksimivoima 10 mm Raex 400 teräksillä, särmäys PI-V130.



Kuva 74. Mitattu ja laskettu maksimivoima 10 mm Raex 500 teräksillä, särmäys PI-V200.

Kuvassa 75 on tarkasteltu koko koeaineistosta saatuja maksimivoiman arvoja ja verrattu niitä Trumpfin kaavalla (3) laskettuihin voimiin. Kuvasta havaitaan, että kaavan antamat voiman arvot ovat n. 100...200 kN mitattuja suurempia. Pienemmillä voimilla ero on hieman suurempi kun taas suuremmilla voimilla kaavan ennustamat voimat ovat hieman lähempänä mitattuja. Mitatuilla ja lasketuilla voimilla on kuitenkin suhteellisen hyvä korrelaatio, koska kaava huomioi painimen säteen. Kaavassa on muuttujana taivutusputuus, jonka vaikutus oletetaan lineaariseksi. Maksimi taivutusvoima ei ole kuitenkaan suoraan verrannollinen taivutusputuuteen. Levyn reuna-alueella muodonmuutos vaatii vähemmän voimaa kuin levyn keskellä. Mitä enemmän levyssä on reuna-aluetta, ts. mitä pienempi taivutusputuus on, sitä pienempi on voiman suhde taivutusputuuteen. Kokeissa käytetyt näytteet olivat taivutusputuudeltaan 285 mm eli suhteellisen lyhyitä. Mahdollisesti Trumpfin kaavan määrittämisessä on käytetty suurempia pituuksia, jolloin kaavan ennustamat voimat ovat suurempia.



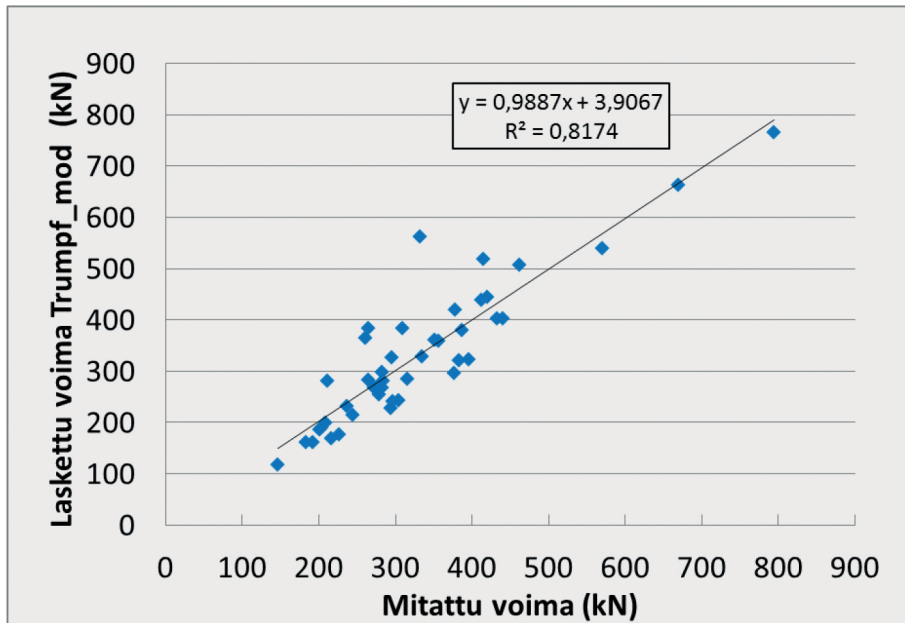
Kuva 75. Mitattujen ja Trumpfin kaavalla laskettujen voimien riippuvuus.

Kaavan testaamiseksi pitäisi tehdä koesarja, jossa olisi useita eri pituuksia, joten tämän tutkimuksen koeaineiston perusteella ei voida laatia kaavaa, joka ennustaisi taivutusputuuden vaikutuksen. Voidaan kuitenkin kokeilla saada Trumpfin kaava (3) paremmin toimivaksi tässä tutkimuksessa käytetylle aineistolle muuttamalla kaavan kertoimia 1,33 ja 2 sellaisiksi, että mitattu ja laskettu maksimi voima ovat lähempänä toisiaan. Kuvassa 76 on tarkasteltu koko koeaineistosta saatuja maksimivoiman arvoja ja verrattu niitä voimiin, jotka on laskettu modifoidulla Trumpfin kaavalla, jossa

kaavassa olevia kertoimia on muutettu sovittamalla kaavan ennustamat voimat koeaineiston kanssa:

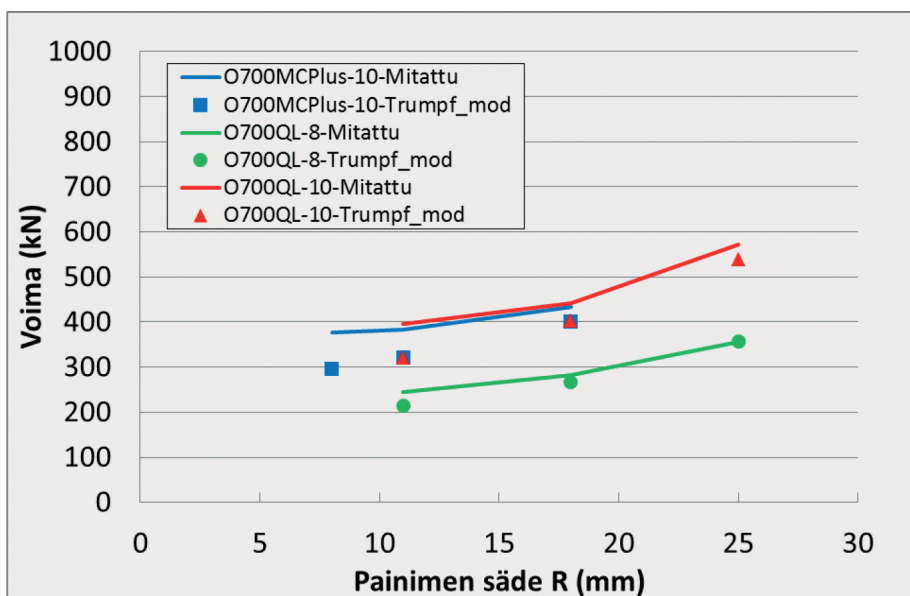
$$F = 0,8 \times \frac{b \times R_m \times t^2}{W - (1,73 \times R_p)} \text{ [N]} \quad (5)$$

Kuvasta 76 nähdään, että mitatut ja lasketut voimat vastaavat nyt huomattavasti paremmin toisiaan, joskin hajonta on hieman suurempi.

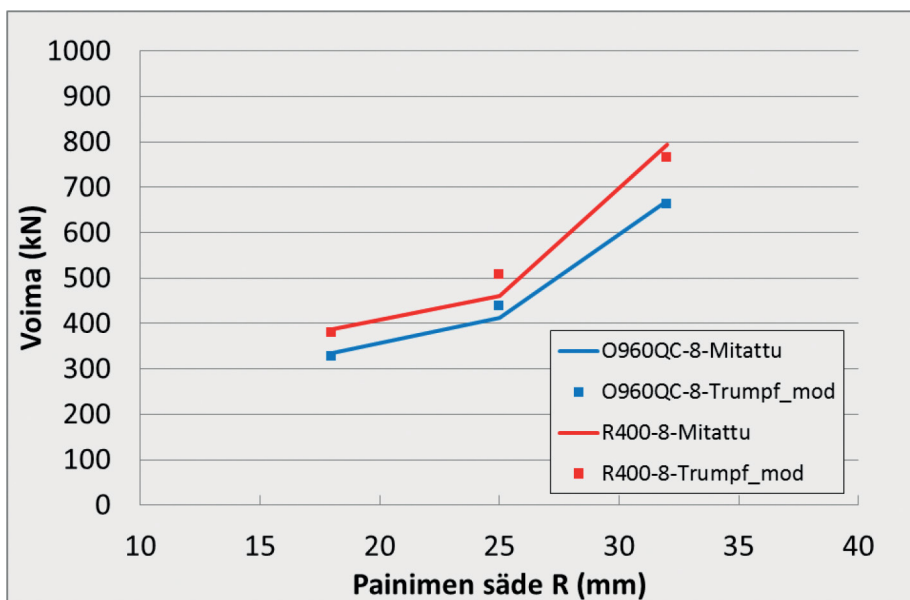


Kuva 76. Mitattujen ja kaavalla 5 laskettujen voimien riippuvuus.

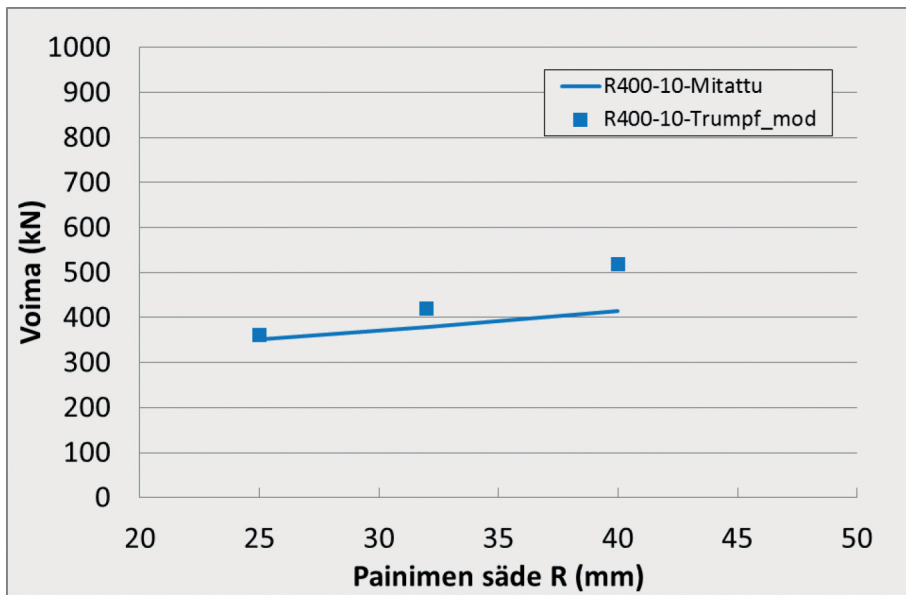
Kuvissa 77-80 on testattu kaavan 5 toimivuutta. Nähdään, että mitattu ja kaavalla laskettu voima ovat lähellä toisiaan ja kaava ennustaa melko hyvin painimen säteen vaikutuksen maksimivoimiin. Painimen säteen kasvaessa kaavan ennustamaan voimaan alkaa kuitenkin tulla enemmän poikkeamaa. Kaavan käytössä on muistettava, että se mahdollisesti toimii vain pienillä taivutuspituuksilla, joita tässä tutkimuksessa käytettiin.



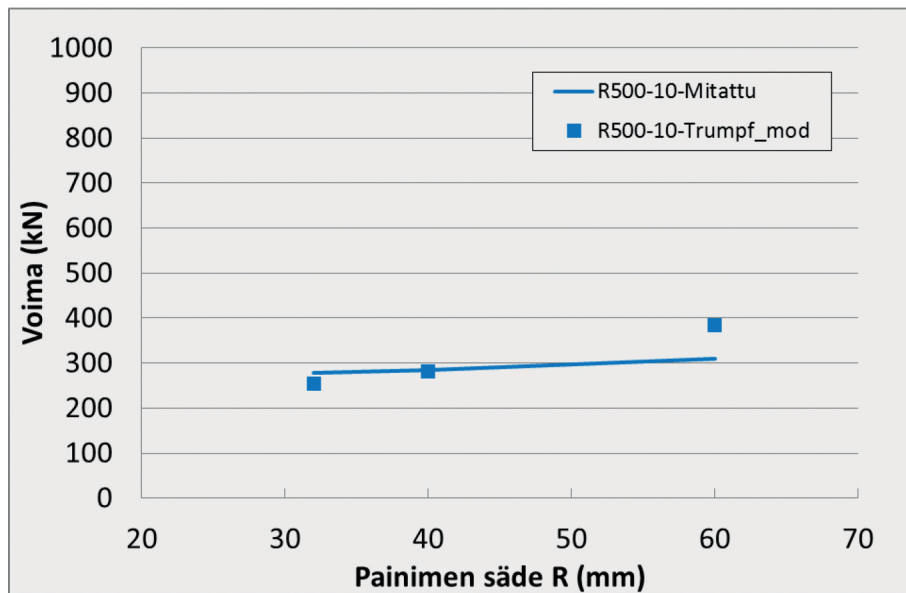
Kuva 77. Mitattu ja modifioidulla Trumpfin kaavalla laskettu maksimivoima 10 mm:n Optim 700 MC Plus ja 8 ja 10 mm Optim 700 QL teräksillä, valssaussuunta PI, V-aukko 80 mm.



Kuva 78. Mitattu ja modifioidulla Trumpfin kaavalla laskettu maksimivoima 8 mm Optim 960 QC ja Raex 400 teräksillä. Valssaussuunta PI, V-aukko 80 mm.



Kuva 79. Mitattu ja modifioidulla Trumpfin kaavalla laskettu maksimivoima 10 mm Raex 400 teräksellä, valssaussuunta PI, V-aukko 130 mm.

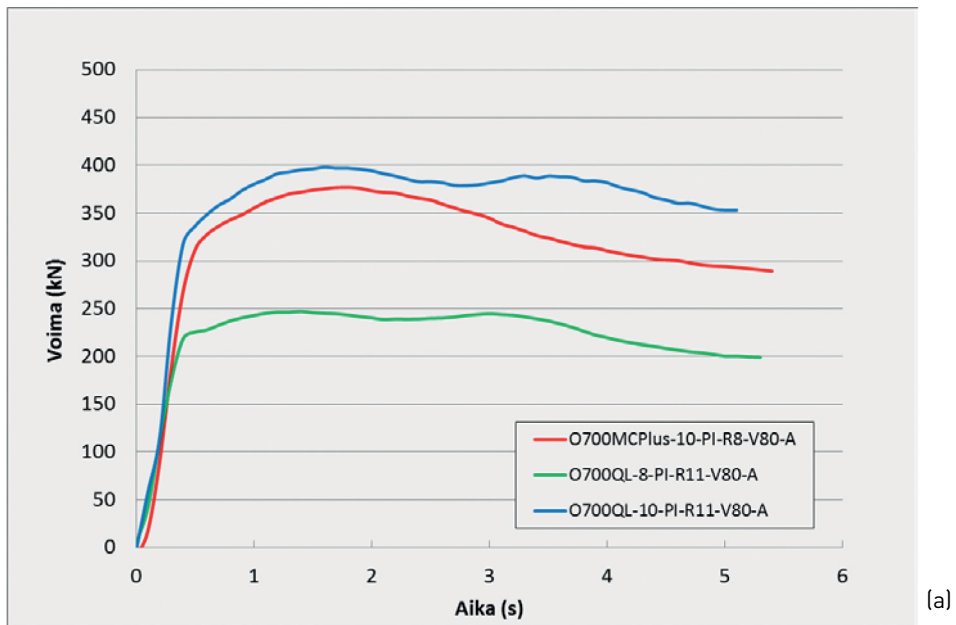


Kuva 80. Mitattu ja modifioidulla Trumpfin kaavalla laskettu maksimivoima 10 mm Raex 500 teräksellä, valssaussuunta PI, V-aukko 200 mm.

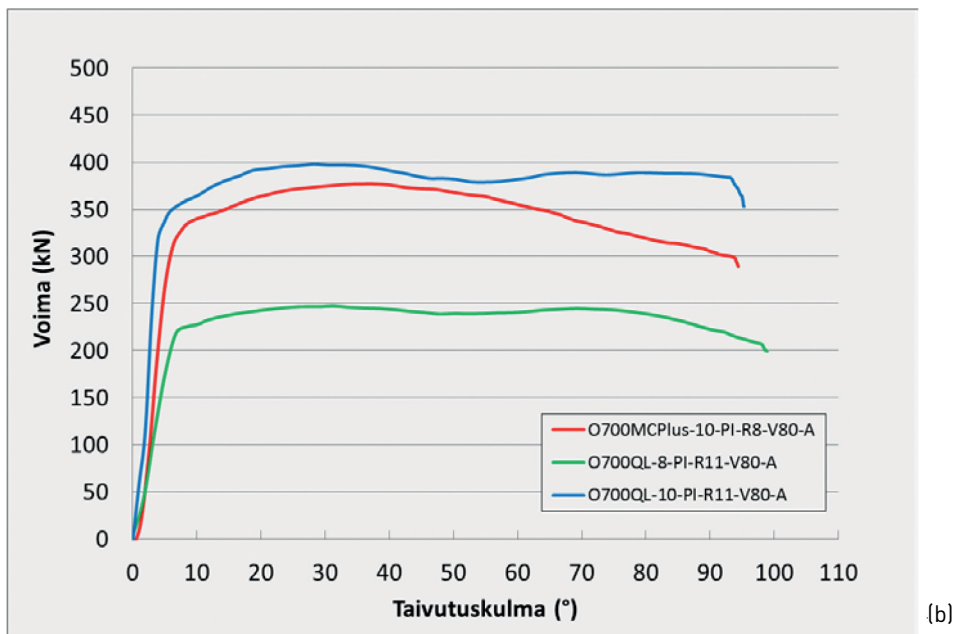
Kuvissa 19-25 on esitetty aika-voima-käyrät eri koemateriaaleille erilaisilla työkaluyhdistelmillä. Yleisenä havaintona voidaan todeta, että käyrissä voiman maksimi näyttää pienemmillä painimen säteillä suhteessa V-aukon mittaan olevan alussa kun taas suuremmilla painimen säteillä suhteessa V-aukon mittaan maksimivoima nousee korkeammaksi vasta särmäyksen lopussa. Pitkittäisen ja poikittaisen valssaussuunnan ero näkyy joidenkin materiaalien kohdalla, mikä johtuu lujuuserosta pitkittäin ja poikittain (taivutuslinjan ollessa pitkittäin valssaussuuntaan nousee voima suuremmaksi materiaaleilla, joilla lujuus on suurempi poikittain valssaussuuntaan nähden).

Käyrissä nähdään kimmoinen ja plastinen alue kuten vetokäyrissäkin, mutta venymän sijasta x-akselilla on aika ja y-akselilla taivutusvoima. Jännitys-venymäkäyrään verrattuna muodonmuutos ei ole vakio vaan riippuu särmäyskulman muutoksesta ajan suhteen. Kulman muutos hidastuu särmäyksen lopussa johtuen geometriasta. Kuvissa 81-83 on tarkasteltu eräiden käyrien muotoa ensin aika-voima käyrinä (a-kuvat) ja muunnettu aika kulmaksi (b-kuvat). Kulman arvot kullakin ajan hetkellä on saatu mittaamalla ne takaisinjoustopitoisuuksissa käytetyistä kuvista. Graafiseen esitykseen liittyvistä käytännöllisyyssyistä taivutuskulma alkaa 0 °:sta (= suora levy) eikä 180 °:sta, kuten yleensä särmäyksestä puhuttaessa on tapana esittää ja päättyy 90 °:een tai suurempaan kulmaan riippuen takaisinjoustopitoisuudesta.

Kuvista nähdään, että käyrien muoto muuttuu melko paljon erityisesti käyrän lopussa, jossa kulman muutos ajan suhteen hidastuu. Maksimi voimat siirtyvät kulma-voima-käyrissä kohti käyrän loppua verrattuna aika-voima-käyriin. Kulma-voimakäyrä soveltunee paremmin käyrien keskinäiseen vertailuun, koska erilaisilla työkaluyhdistelmillä särmäysaika on erilainen. Muodonmuutosasteen suuruudesta kulma ei välttämättä kerro, koska siihen vaikuttaa myös painimen säde; suuremmilla säteillä muodonmuutos jakautuu suuremmalle alueelle.

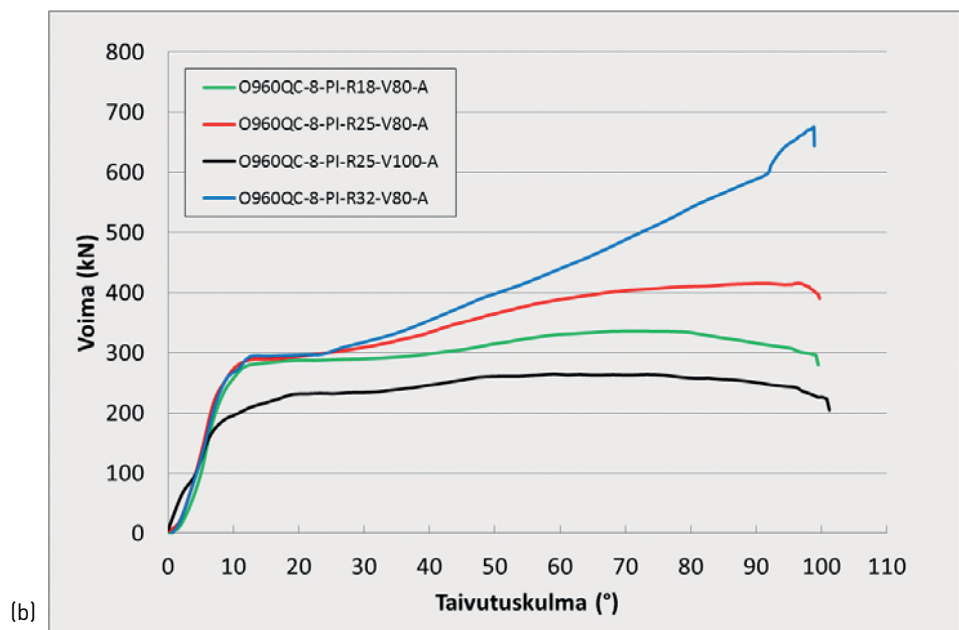
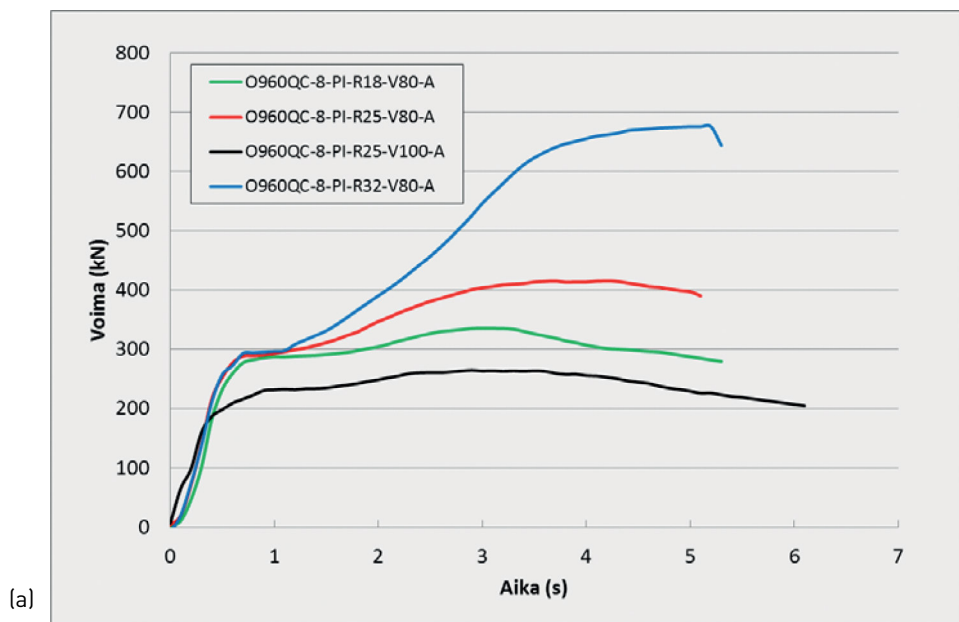


(a)

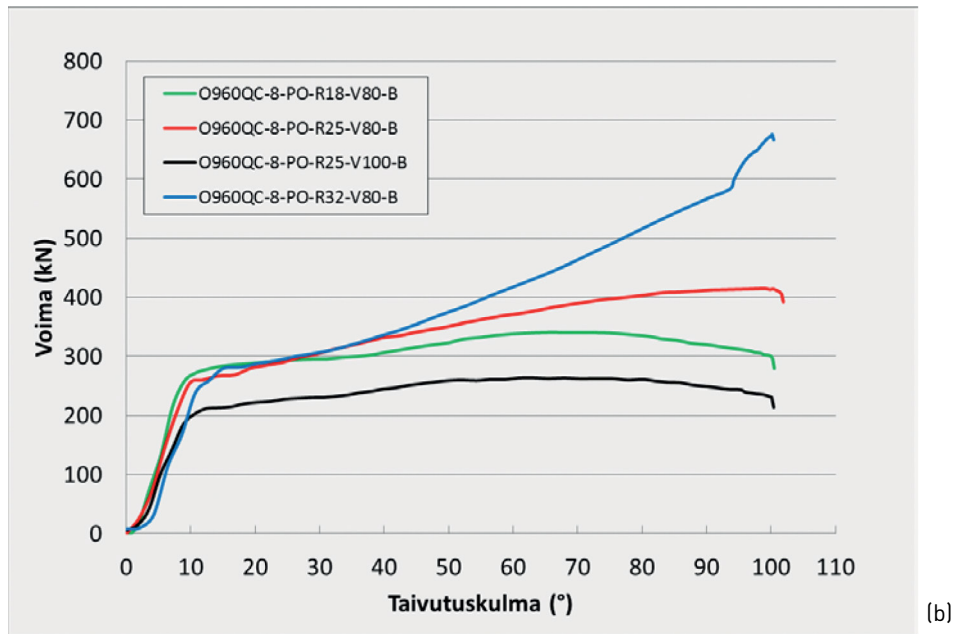
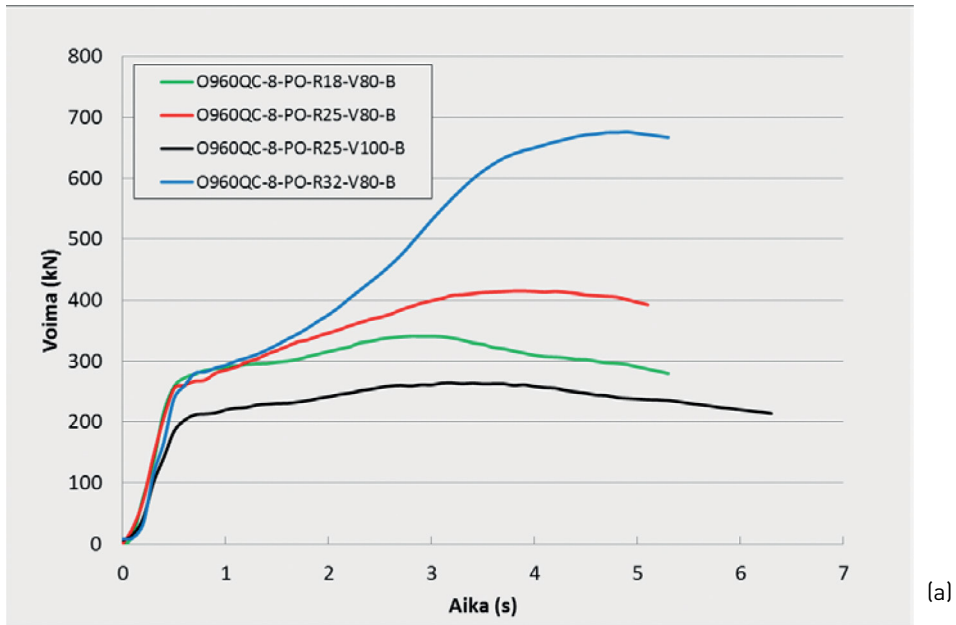


(b)

Kuva 81. a) Aika - voima käyriä b) Taivutuskulma - voima käyriä Optim 700 MC Plus ja 8 ja 10 mm Optim 700 Q teräksillä, valssaussuunta pitkittäin, merkkäuspuoli ylöspäin.



Kuva 82. a) Aika - voima käyriä, b) Taivutuskulma - voima käyriä 8 mm Optim 960 QC teräksellä, valssaussuunta pitkittäin, merkkäuspuoli ylöspäin.



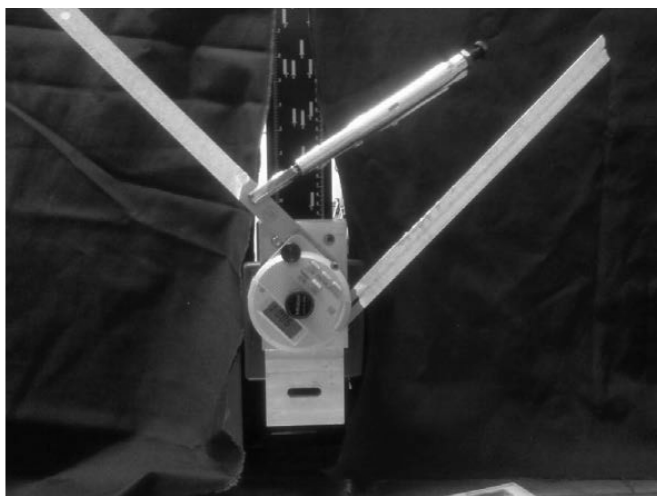
Kuva 83. a) Aika - voima käyriä, b) Taivutuskulma - voima käyriä 8 mm Optim 960 QC teräksellä, valssaussuunta poikittain, merkkauspani alaspäin.

4.2 TAKAISINJOUSTOT

Kuvissa 26-32 esitettiin särmäystyökalujen vaikutus eri koemateriaalien takaisinjousto-
toon. Tuloksista nähdään, että takaisinjousto kasvaa sekä painimen säteen, että V-
aukon mitan kasvaessa. Samoin lujuuden kasvaessa takaisinjousto kasvaa kuten odo-
tettavissa on. Myös paksuudella on vaikutusta takaisinjousto-
on. Kuvista 27 ja 28 näh-
dään, että Optim 700 QL teräksellä takaisinjousto pienenee kun paksuus kasvaa 8
mm:sta 10 mm:iin kun käytetyt työkalut ovat samoja. Ko. materiaalien myötölujuudet
ovat lähellä toisiaan, joten eron takaisinjoustossa voidaan olettaa johtuvan pelkästään
paksuudesta. Muilla materiaaleilla (Raex 400:lla paksuudet 8 ja 10 mm) paksuuden
vaikutusta ei voida verrata, koska ko. materiaaleilla käytetyt työkaluyhdistelmät oli-
vat erilaisia ja siitä johtuen takaisinjoustot poikkeavia.

Valssaussunnalla ei näytä olevan kovin suurta vaikutusta takaisinjousto-
on edes Optim 700 MC Plus:lla, jolla ero lujuuksissa pitkittäis- ja poikittaissuuntien välillä on
suurin tai sen vaikutus vaihtelee suuntaan tai toiseen. Myöskään sillä, onko särmäys
tehty merkkaukspuoli ylöspäin (A) vai alaspäin (B) ei näytä olevan kovin selkeää vai-
kutusta tai vaikutus vaihtelee. Suurimmillaan takaisinjousto on 10 mm:n Raex 500:lla
jopa 40 astetta, kun painimen säde oli 100 mm ja V-aukon mitta 240 mm. Käytännös-
sä näytettä ei enää pystytty särmäämään tällöin 90 asteen kulmaan vaan suuresta
takaisinjoustosta johtuen loppukulma jäi noin 100 asteeseen.

Konenäön kulmamittauksen tarkkuus määritettiin kuvaamalla tunnettua kulmaa.
Tunnettu referenssikulma muodostettiin digitaalisella kulmamittarilla, jonka tark-
kuus oli $\pm 0.03^\circ$. Kulmamittaria kuvattiin kahdella eri kuvausetaisuudella ja eri koh-
dissa kuva-aluetta. Maksimipoikkeama konenäöllä mitatulla kulmalla referenssikul-
masta oli 0,7 astetta, kun käytettiin referenssikulmana 100 astetta ja kohde sijaitsi
kuva-alueen reunoilla. Mitattu kulma oli 99,3 astetta. Kuva-alueen reunoilla esiintyy
yleensä suurimmat virheet johtuen optiikan aiheuttamista vääristymistä. Kuvassa 84.
on esitetty digitaalinen kulmamittari tarkkuustestiympäristössä.



Kuva 84. Digitaalinen kulmamittari tarkkuustestiympäristössä.

4.3 MINIMITAIVUTUSSÄTEIDEN ARVIOINTI

Eri teräksille erilaisilla työkaluilla särnäyttäessä silmämääräisesti määritetty mutterimaisuus on esitetty kuvissa 30-38 ja säröaste kuvissa 40-45. Säröasteen määrittämisessä käytettiin asteikkoa 0...3 sen mukaan, kuinka voimakasta pinnan säröily oli. Kuvissa 64-71 on tarkasteltu valomikroskooppilla joidenkin särnäyttäjien näytteiden poikkileikkauksia. Kuvassa 64, 66, 68 ja 70-71 nähdään pienellä säteellä taivutettujen särmien ulkopintaa, missä on nähtävissä pinnan topografia. Pinnassa näkyy muutaman kymmenen mikrometrin levyisiä ja n. 10 mikrometrin korkuisia aaltoja, jotka sekä silmämääräisessä että koenäkö tarkastelussa on tulkittu säröiksi. Kuten kuvasta nähdään, ei varsinaisia säröjä kuitenkaan ole havaittavissa vaan kyseessä on kuroumajuovatyypinen vika. Varsinaisia säröjä kokeissa ei särmien ulkopinnoille syntynyt kuin yksittäistapauksissa. Kuvassa 64 nähdään myös heti pinnan alla hyvin voimakkaasti muokkautunutta rakennetta. Joissakin näytteissä oli mikroskooppitarkasteluissa havaittavissa särmän sisäpinnalla kuvien 65, 67 ja 69 kaltaisia vikoja, jotka voitaneen tulkita säröiksi, mutta painimen aiheuttaman painauman vuoksi sisäsärmien visuaalinen tarkastelu oli vaikeaa, eikä sitä tehty enemmässä määrin.

Taulukossa 6 on tulosten perusteella luokiteltu säröilyn ja mutterimaisuuden vakavuus kolmeen eri luokkaan siten, että vihreällä luokitellut tapaukset ovat lieviä ja punaisella luokitellut tapaukset säröasteen tai mutterimaisuuden suhteen huonoimpia. Keltaisella merkityt tapaukset sijoittuvat näiden väliin. Luokittelu on tehty siten, että särnäyskokeiden tuloksista on valittu se puoli (A tai B), jonka tulos on ollut huonompi.

Säröasteen määrittelyssä oli käytössä neliportainen asteikko 0, 1, 2, 3, missä 0 tarkoitti sitä, että minkäänlaisia säröjä ei ollut havaittavissa. Säröasteikon pienin arvo 1 tarkoitti erittäin lievää säröä. Se, mitä pidetään sallittuna säröasteena, on määrittelykysymys ja saattaa riippua tuotteen käyttötarkoituksesta, mutta voidaan asettaa rajaksi esimerkiksi säröasteen arvo 1, mitä suurempi säröaste ei enää ole hyväksyttävissä. Taulukkoon on merkattu vihreällä säröasteet $\leq 1,0$, joita voidaan pitää tässä tapauksessa hyväksyttävinä ja keltaisella ja punaisella tätä suuremmat säröasteet.

Mutterimaisuudessa oli käytössä kolmiportainen asteikko 0, $\frac{1}{2}$, 1, missä 0 tarkoitti sitä, että mutterimaisuutta ei havaittu, 1 oli selvä mutterimaisuus ja $\frac{1}{2}$ oli lievä mutterimaisuus. Taulukkoon on merkitty vihreällä mutterimaisuus 0...0,2, mikä käytännössä tarkoittaa, että mutterimaisuutta ei ole juuri lainkaan. Punaisella on merkitty mutterimaisuus 0,7...1, mikä tarkoittaa selvää mutterimaisuutta. Keltaisella on merkitty välialue 0,3...0,6, jolloin lievää mutterimaisuutta oli havaittavissa.

Taulukosta nähdään, että useissa tapauksissa särnäyttäessä pitkittäin valssausuuntaan nähden (taivutuslinja samansuuntainen valssaus suunnan kanssa), on säröjen muodostuminen voimakkaampaa kuin poikittain valssausuuntaan nähden särnäyttäessä. Tästä syystä minimitaivutussädettä määritettäessä olisi hyvä erottaa nämä toisistaan ja määrittää minimitaivutussäde erikseen pitkittäin ja poikittain valssausuuntaan nähden särnäyttäessä. Osittain ohjearvoissa näin on menetelty.

Kuten nähdään, esim. Optim 700 MC Plus teräksellä näyttäisi, että minimitaivutussäteen ohjearvo 10 mm:n ainepaksuudella on 10 mm, mikä saattaa pitkittäin olla

hieman liian pieni tuloksiin nähden, mutta poikittain sen sijaan ohjearvo olisi hyvä. Tosin kyseinen paksuus on juuri rajalla, mitä suuremmilla paksuuksilla ohjearvo taivutussäteelle on 18 mm, mikä on tuloksiin nähden sopiva. Samoin on laita myös Optim 960 QC teräksellä, jolla poikittain särmättäessä taivutussäde näyttäisi voivan olla selvästi pienempi. Ohjearvo minimitaivutussäteelle on 28 mm, mikä on näiden tulosten valossa sopiva, mutta varsinkin poikittain särmätessä taivutussäde voisi olla ohjearvoa selvästi pienempikin. Raex 400:lla näyttäisi ohjearvojen mukaiset minimitaivutussäteet olevan melko hyvin linjassa tämän tutkimuksen tulosten kanssa, joskin silläkin poikittain särmätessä taivutussäde näyttäisi voivan olla hieman ohjearvoa pienempi. Optim 700 QL:n kohdalla näyttäisi selkeästi siltä että ohjearvojen mukaiset minimitaivutussäteet olisivat liian suuria eli näiden tulosten mukaan sekä pitkittäin että poikittain teräksiä voisi särmätä tiukemmilla taivutussäteillä. Raex 500:n kohdalla tässä koesarjassa tehdyillä taivutussäteillä ei säröilyä havaittu lainkaan, joten ohjearvon mukainen minimitaivutussäde 100...120 mm on ainakin tässä tutkimuksessa käytetyille näytemateriaalille selvästi liian suuri.

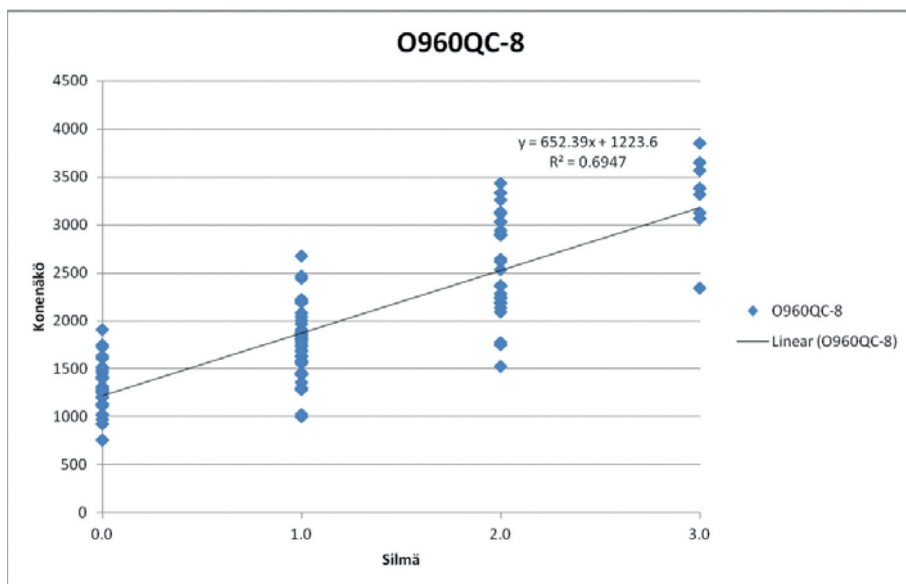
Taulukko 6. Koetulosten luokittelu säröasteen ja mutterimaisuuden perusteella.

Materiaali	Ruukin ohje					Kokeet	Säröaste										Mutterimaisuus														
	Paksuus (mm)	Painin		Rmin mm	Vastin		0...1,0										0...0,2														
		V.S.	Paksuus(mm)		V/t min		V	Vastin			Painimen säde (mm)										Painimen säde (mm)										
								V.S.	V/t	V(mm)	8	11	18	25	32	40	60	80	100	8	11	18	25	32	40	60	80	100			
Optim 700 MC Plus	10	>8≤10 >10≤12	10 18	- -	- -	PI	8	80	2,0	1,2	1,0									0,4	0,0	0,0									
							10	100	2,2	1,2										0,1	0,0										
							13	130	1,8											0,5											
							PO	8	80	0,8	0,0	0,0								0,0	0,0	0,0									
Optim 700 QL	8	>7≤8 >8≤10	24 30	- -	- -	PI	10	80		1,0	0,6	0,4							1,0	0,0	0,0										
							12,5	100		1,0	0,4								0,1	0,0											
							16,25	130		1,0									0,0												
							PO	10	80		1,0	0,8	0,0							0,5	0,0	0,0									
Optim 700 QL	10	>8≤10 >10≤12	30 36	- -	- -	PI	8	80	1,8	0,8	1,0							1,0	0,1	0,0											
							10	100	1,8	1,0		0,0							0,6	0,0		0,0									
							13	130	1,8										0,7												
							PO	8	80	2,0	1,8	1,0							0,5	0,2	0,0										
Optim 960 QC	8		28	-	-	PI	10	80		2,4	1,4	0,4							1,0	1,0	0,2										
							12,5	100		2,2	2,0								0,8	0,9											
							16,25	130		2,6									1,0												
							PO	10	80		1,0	0,0	0,0						1,0	0,7	0,0										
Raex 400	8	PI	36	11	88	PI	10	80		1,0	0,6	0,0						1,0	0,5	0,0											
							12,5	100		1,2	0,8								0,9	0,5											
							16,25	130		2,0									1,0												
							PO	10	80		0,6	0,0	0,0						0,7	0,1	0,0										
Raex 400	10	PI	40	11	110	PI	13	130		2,0	1,8	0,8							0,2	0,1	0,0										
							16	160		2,4	2,2								0,8	0,0											
							20	200		2,0									0,5												
							PO	13	130		1,0	1,0	0,0						0,2	0,0	0,0										
Raex 500	10	PI	120	27	270	PI	20	200				0,0	0,0	0,0						0,0	0,0	0,0									
							24	240							0,0	0,0									0,0	0,0					
							27	270								0,0	0,0								0,0	0,0					
							PO	20	200				0,0	0,0	0,0									0,0	0,0	0,0					

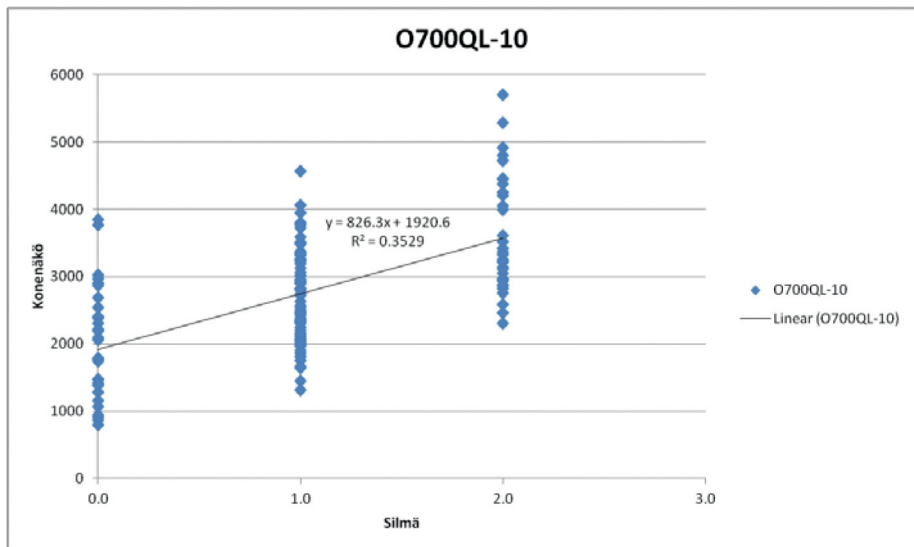
Mutterimaisuus näyttää olevan myös ainakin jonkin verran voimakkaampaa pitkittäin valssaussuuntaan särmättäessä. Voimakkainta mutterimaisuus näyttää olevan Optim 960 QC teräksellä, mutta sillä myös käytetyt taivutussäteet ovat melko pieniä suhteessa ohjearvoihin. Yleisesti ottaen mutterimaisuutta ilmenee vasta sen jälkeen kun säröjen muodostuminen on jo niin voimakasta, että sitä ei enää voi hyväksyä. Poikkeuksena voi ehkä olla Optim 960 QC teräs, jolla myös poikittain valssaussuuntaan särmätessä mutterimaisuutta ilmeni melko voimakkaasti vaikka säröjen muodostuminen oli selvästi lievempää. Vaikka säröjen puolesta taivutussäde olisi sopiva, saattaa mutterimaisuuden takia kuitenkin olla parempi käyttää suurempaa taivutussädettä.

4.4. SÄRÖASTEIDEN VERTAILU: SILMÄMÄÄRÄINEN VS. KONENÄKÖ

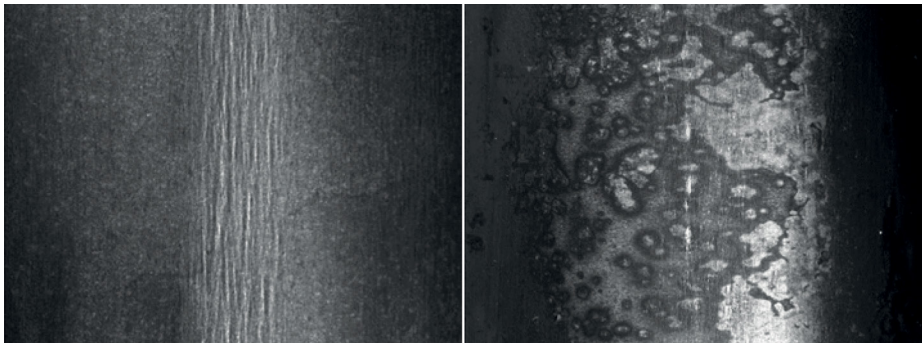
Konenäöllä tehtävän ja silmämääräisen säröasteen tarkastelun välillä näyttäisi olevan korrelaatiota, kun käytetään harmaasävyiltään tasalaatuista metallipintaa. Kun näytteen pinnassa on erilaisia kuvioita, häiritsevät ne konenäöllä tehtävää tarkastelua merkittävästi. Kuvissa 85 ja 86 on esitetty vastaavuudet konenäön ja silmämääräisen tarkastelun välillä hyvällä ja huonolla näytteellä. Kuvassa 87 on esitetty molempien näytteiden säröasteen testikuvat. 8 mm:n Optim 960 QC (vasen kuva) edustaa pinnaltaan hyvää näytettä ja vastaavasti 10 mm:n Optim 700 QL (oikea kuva) huonoa näytettä.



Kuva 85. Silmämääräisen ja konenäkö säröasteen välinen vastaavuus hyvällä näytteellä (Optim 960 QC – 8 mm).



Kuva 86. Silmämääräisen ja konenäkö säröasteen välinen vastaavuus huonolla näytteellä (Optim 700 QL – 10 mm).



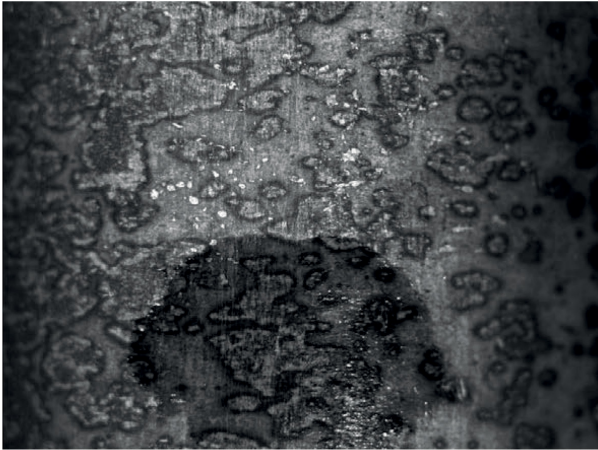
Kuva 87. Vasemmalla säröasteen tunnistuskuva 8 mm:n Optim 960 QC-näytteestä ja oikealla 10 mm:n Optim 700 QL-näyte.

4.5 SÄRÖASTEEN TUNNISTAMISEN PARANTAMINEN

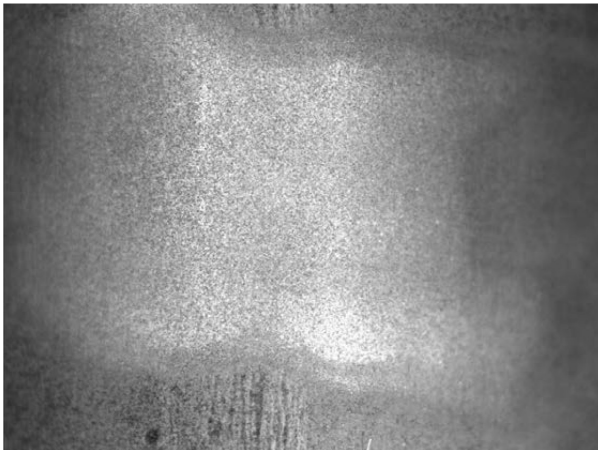
Konenäöllä tehtävän säröasteen tunnistamisen parantamiseksi tehtiin erilaisia testejä, joilla pyrittiin poistamaan tai vähentämään näytteen pinnan aiheuttamia virheitä säröasteen määrittämisessä. Testattavina olivat immersioöljy, jota käytetään mikroskoopeissa parantamaan kuvanlaatua. Tunkeumaneste ja magneettijauhe, joilla havaitaan erilaisia halkeamia näytteissä. Suolahappo, jolla puhdistetaan näytteitä ja ultraviolettivalon ja aineiden testaus.

Immersioöljytestillä ei ollut parantavaa vaikutusta säröjen havaitsemiseen, kuten havaitaan kuvasta 88. Tunkeumanestetestissä käytettiin CRC Crick tuoteperheen aineita. Aineiden käyttö huononsi tilannetta, koska ne peittivät kokonaan pinnassa olevat pienet säröt/kuroumajuovat kuten havaitaan kuvasta 89.

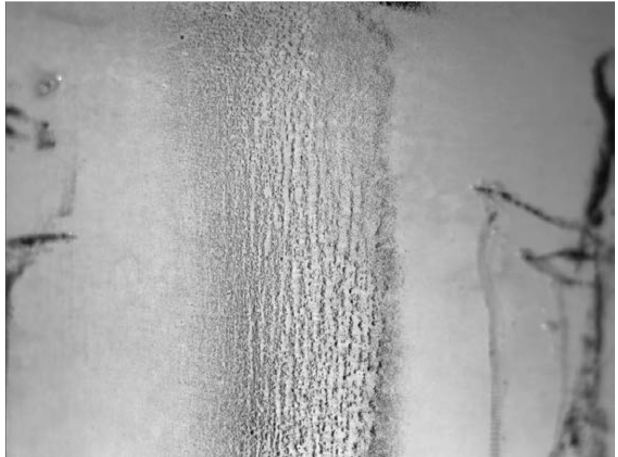
Magneettijauhetestissä käytettiin Bycotest magneettijauhetta ja sähkömagneettia, jolla aine levitettiin näytteen pintaan. Osittain magneettijauhe saatiin pysymään säröissä, mutta sen tasainen levitys tuotti ongelmia. Kuvassa 90 on esitetty magneettijauhe levitettynä Optim 960 QC-näytteelle.



Kuva 88. Immersioöljytesti Optim 700 QL-näytteelle.

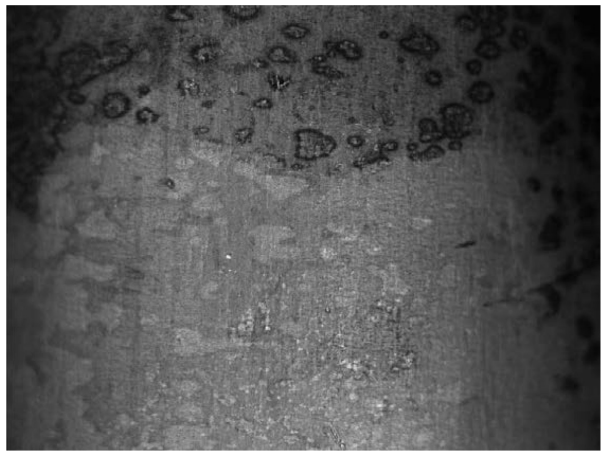


Kuva 89. Tunkeumanestetesti Optim 960 QC-näytteelle.



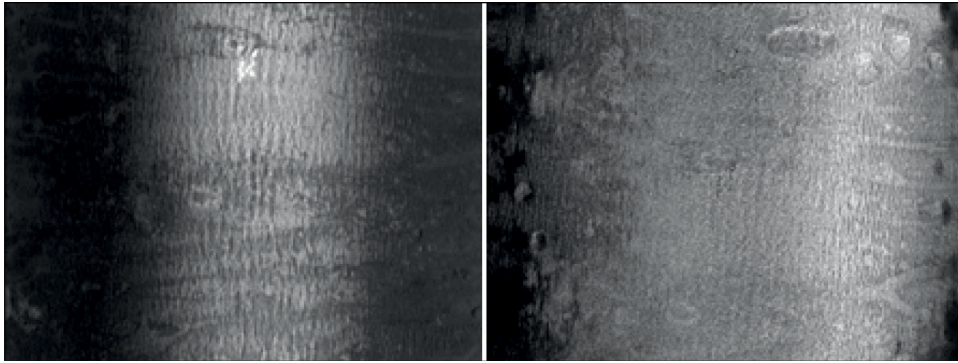
Kuva 90. Magneettijauhetesti Optim 960 QC-näytteelle

Särmän taivealuetta puhdistettiin 18 % suolahapolla, jotta näyte olisi tasasävyisempi ja särön tunnistusta haittaavat sävyerot pienenisivät. Kuvassa 91 on Optim 700 QL-näytteen alaosa puhdistettu suolahapolla. Kun laskettiin säröytymisen tunnusluku samalle puhdistamattomalle näytteelle, saatiin tunnusluvuksi 3100. Puhdistetulle alueelle saatiin tunnusluvuksi 1600 eli noin puolet pienempi kuin puhdistamattomalle. Silmämääräisesti arvioitaessa näytteessä ei havaittu säröjä eli tämän perusteella puhdistus parantaisi konenäöllä tehtävää säröytymisen tunnistamista.



Kuva 91. Suolahappotesti Optim 700 QL-näytteelle.

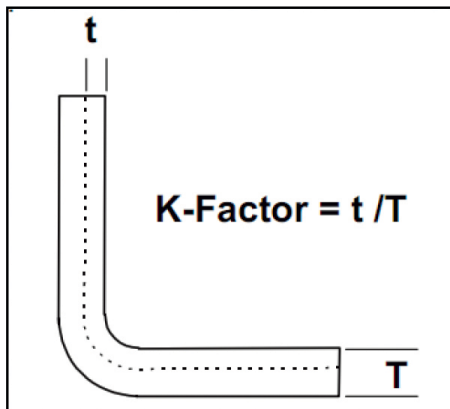
Ultraviolettivalo testissä käytettiin erilaisia nestemäisiä ja kiinteitä aineita, jotka heijastavat uv-valoa. Kuvassa 92 vasen näytekuva on otettu ennen UV-leimasinnesteen levittämistä ja oikeanpuoleinen kuva aineen levityksen jälkeen. UV-nesteellä saatiin häivytettyä kuvan alareunassa oleva tumma-alue, joka häiritsi särön tunnistamista. Samalla uv-neste häivytti myös kontrastieroja oikeista särökohdista. Testien perusteella uv-aineiden ja valojen käytöllä ei saatu parannettua säröjen tunnistamisen luotettavuutta.



Kuva 92. Ennen ja jälkeen UV-nesteen levittämistä.

4.6 NEUTRAALIAKSELIT JA K-ARVOT SEKÄ SÄRMÄN POIKKILEIKKAUSPROFIILIT

Kuvissa 52-63 on esitetty kovuusmittausten tulokset. Nähdään, että sekä särmän ulko- että sisäpinnan läheisyydessä kovuus kasvaa johtuen muokkauslujittumisesta. Keskellä on kovuudessa minimi, joka on merkitty punaisella pisteellä sekä kovuusminimin etäisyys särmän ulkopinnasta ja särmän sisäpinnasta. Kyseisessä kohdassa oletetaan olevan neutraaliakselin. Neutraaliakselin paikasta lasketaan K-arvo kaavalla $K = t / T$ kuvassa 93 esitetyn mukaisesti.



Kuva 93. K-arvon laskeminen.

Taulukoon 7 on laskettu K-arvot siten että t:n ja T:n arvot on laskettu kuvissa näkyvien mittausjanojen (7 kpl) keskiarvoina ja niistä on laskettu K.n arvot.

Taulukko 7. K-arvot eri taivutussäteillä.

Materiaali	R (mm)	V (mm)	t	T	K
Optim 700 MC Plus - 10 mm	8	80	4,5	9,6	0,47
	18	80	4,3	9,7	0,44
Optim 700 QL - 8 mm	11	80	3,5	7,8	0,45
	25	80	3,9	8,0	0,49
Optim 700 QL - 10 mm	11	80	4,3	9,7	0,44
	25	80	4,5	9,6	0,47
Optim 960 QC - 8 mm	18	80	3,6	7,7	0,47
	32	80	3,6	7,6	0,47
Raex 400 - 8 mm	18	80	3,7	7,7	0,47
	32	80	3,7	7,7	0,49
Raex 400 - 10 mm	25	130	4,7	9,9	0,47
	40	130	4,8	10,0	0,48

Taulukosta nähdään, että K-arvot vaihtelevat välillä 0,49...0,44. Useimmissa tapauksissa K-arvo pienenee taivutussäteen pienentyessä eli neutraaliakseli siirtyy kohti särmän sisäreunaa. Sen sijaan Optim 960 QC:llä K-arvo pysyy muuttumattomana taivutussäteen pienentyessä ja Optim 700 MC Plus teräksellä se jopa hieman kasvaa. Tämä on hieman ristiriidassa teorian kanssa, koska neutraaliakselin pitäisi siirtyä kohti sisäreunaa taivutussäteen pienentyessä. Tulos saattaa johtua siitä, että pienellä 8 mm:n taivutussäteellä särmätyn näytteen kohdalla alussa käytettiin 0,5 mm:n väliä kovuusmittauksissa, jonka vuoksi tarkkuus ei ole niin hyvä kuin muissa mittauksissa, joissa mittausväliä pienennettiin 0,25 mm:iin. Kuten kuvasta 52 nähdään, on seuraavien 0,5 mm kohti särmän sisäreunaa olevien kovuusmittausten arvot melko lähellä neutraaliakseliksi merkityn mittauksen arvoja, joten todellisuudessa neutraaliakseli saattaa olla 0,3-0,4 mm sisempänä. Tämä huomioiden K-arvoksi tulisi selvästi pienempi luku, mikä todennäköisesti olisi pienempi kuin suuremmalla 18 mm:n taivutussäteellä särmätyssä näytteessä. Menetelmän tarkkuus on sitä suurempi, mitä pienemmällä tiheydellä mittaukset suoritetaan, mutta tällöin rajoituksia asettaa se, että vierekkäiset kovuusmittaukset alkavat häiritsemään toisiaan. Nyt käytetty massa HV5 ja 0,25 mm:n mittausväli eivät ole enää standardin mukaisia vaan mittauspisteiden pitäisi olla kauempana toisistaan, mikäli esim. kovuuksien todelliset arvot haluttaisiin mitata tarkasti.

Varsinkin tiukemmilla taivutussäteillä materiaali ohenee voimakkaasti aivan keskeltä kuten kuvista näkyy. Esim. Optim 700 MC Plus teräksellä paksuus on ohuimmillaan vain n. 9 mm eli teräs on ohentunut n. 1 mm:n alkuperäiseen n. 10 mm:n

paksuuteen verrattuna. Levy on irronnut painimesta muutamia mm:n kymmenyksiä. Taivutussäteen kasvaessa irtoaminen näyttää jonkin verran pienevän useissa tapauksissa.

Taulukosta 5 nähdään, että kaikissa särmäyksissä sisäsäde on pienempi verrattuna painimen säteeseen. Absoluuttinen ero kasvaa taivutussäteen kasvaessa, mutta suhteellinen ero pysyy suunnilleen samana ollen useimmissa tapauksissa luokkaa n. 15...25 %.

Yhteenveto

V-aukon mitta ja painimen säde vaikuttaa voimakkaasti taivutusvoimaan. Voima kasvaa toisaalta V-aukon mitan pienentyessä, toisaalta painimen säteen suurentuessa. Useimmat voimaa ennustavat kaavat eivät ota huomioon painimen sädettä vaan säteen kasvaessa niiden ennustama voima on liian pieni. Trumpfin kaava ottaa huomioon myös painimen säteen ja modifioimalla kaavan kertoimia, sen ennustamat voimat saadaan vastaamaan melko hyvin kokeiden tuloksia.

Takaisinjousto kasvaa sekä V-aukon mitan kasvaessa että painimen säteen kasvaessa. Mitä lujempaa ja terästä särmätään, sitä suuremmaksi takaisinjousto kasvaa. Myös materiaalin paksuus vaikuttaa takaisinjousto. 10 mm:n Optim 700 QL teräksellä takaisinjousto on vähäisempää kuin 8 mm:n vastaavalla teräksellä samoja työkaluja käytettäessä. 10 mm:n Raex 500 teräksellä käytettäessä suurta V-aukkoa ja painimen sädettä (esim. V270 / R100, jotka ovat ohjearvon mukaisia) takaisinjousto voi olla jopa 40 astetta, mikä asettaa suuria vaatimuksia särmäykselle. Kokeiden mukaan kyseinen teräs kuitenkin voitiin särmätä huomattavasti pienemmillä säteillä (ja V-aukoilla), jolloin takaisinjousto oli ”vain” 25-30 astetta.

Mutterimaisuus ja säröytyminen voimistuvat painimen säteen pienentyessä. Joissakin tapauksissa särmäyksessä voidaan mahdollisesti käyttää tutkittujen terästen kohdalla ohjearvoja pienempää minimitaivutussädettä. Mikrorakennetarkasteluissa säröytyminen oli kuroumajuovatyypistä pinnan aaltomaisuutta. Säröytymisen ja mutterimaisuuden tunnistamiseen kehitetyt konenäköön perustuvat laitteistot ja menetelmät näyttäisivät toimivan tietyin rajoituksin. Konenäöllä tehtävän ja silmämääräisen säröasteen tarkastelun välillä näytti olevan korrelaatiota, kun käytettiin harmaasävyltään tasalaatuista metallipintaa. Erilaiset näytteen pinnassa olevat kuviot häiritsivät merkittävästi konenäöllä tehtävää tarkastelua. Kun pintakuviot poistettiin tai niiden näkyvyyttä heikennettiin suolahappo puhdistuksella, saatiin alustavien testien perusteella parannettua säröytymisen tunnistamisen luotettavuutta. Mutterimaisuuden tunnistamiseen kehitetty ledviivavalaisu ja laskentamenetelmä näyttivät tunnistavan mutterimaisuuden näytteestä alustavien testien perusteella.

Särmien poikkileikkauksista mitattujen kovuus- ja paksuusjakaumien perusteella määritettyjen neutraaliakselin paikkojen ja niistä laskettujen K-arvojen suuruus vaihtelee tutkituissa tapauksissa välillä 0,44...0,49 eli olivat keskilinjasta särmän si-
säreunaan päin. Taivutussäteen kasvaessa neutraaliakseli siirtyy useimmissa tapauk-

sisä kohti särmän sisäreunaa eli K-arvo pienenee. Särmän irtoaminen työkalusta aiheuttaa sen, että sisäsäde on pienempi kuin työkalun säde. Taivutussäteen pienentyessä irtoamisen määrä voimistuu.

Kirjallisuus

1. Rissanen, T., Tekninen raportti, Ultralujien terästen käyttö ja konepajaprosessit, Tutkimus kuumavalssattujen ultralujien rakenne- ja kulutusterästen käytettävyydestä, KuURak-projekti, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2010.
2. Inline, Ruukin sidosryhmälehti 01/2012, s 33.
3. Erkkilä, J., Ruukki, Henkilökohtainen tiedonanto 3.10.2011.
4. Rautaruukki Oyj, esite, Optim MC rakenneteräkset, 2012. Luettu 1.2.2012 <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-MC/>
5. Rautaruukki Oyj, esite, Optim 700 QL rakenneteräkset, 2012. Luettu 1.2.2012. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-700-QL/>
6. Rautaruukki Oyj, esite, Optim QC rakenneteräkset, 2012. Luettu 1.2.2012. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC/>
7. Rautaruukki Oyj, esite, Kulutuksenkestävä Raex-teräs, 2012. Luettu 1.2.2012. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Kulutusterakset/Kulutuksenkestava-Raex-teras/>
8. Rautaruukki Oyj, esite, Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat, Särmäys, Raex® kulutusteräkset, ultralujat Optim® QC teräkset, 2011. Luettu 1.2.2012. <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.pdf>
9. Metal Forming Handbook. Göppingen: Schuler GmbH, 1998. ISBN 3-540-61185-1.
10. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, Technical information, Bending technology, 10/2006. Luettu 1.2.2012. http://www2.trumpf.com/3.img-cust/Library_Bending_Technology_2006-10.pdf

Tässä raportissa on esitetty Tekesin rahoittamassa KuURaK-projektissa Kemi-Tornion ammattikorkeakoulussa Materiaalien Käytettävyyden Tutkimusryhmässä (MKT) ja Optisen Mittaustekniikan Laboratoriossa (OML) tehtyjen särmäystutkimusten tulokset. Tutkittavat teräkset olivat Ruukin ultralujia (UHSS) teräksiä Optim 700 MC Plus, Optim 700 QL, Optim 960 QC, Raex 400 ja Raex 500 paksuudeltaan 8 tai 10 mm. Koemateriaaleja särmättiin 90 asteen kulmaan käyttäen erilaisia painimen säteitä ja V-aukkojen mittoja. Särmäyksen aikana mitattiin taivutusvoima ja särmäystapahtuma kuvattiin takaisinjouston määrittämiseksi kehitetyllä konenäkösovelluksella. Särmäytystä näytteistä tarkasteltiin särmän laatua silmämääräisellä tarkastelulla sekä säröasteen määrittämiseen kehitetyllä konenäkösovelluksella ja vertailtiin tarkastusmenetelmiä keskenään. Särmien poikkileikkauksesta määritettiin kovuusmittausten avulla neutraaliakselin paikka ja särmien sisäsäteet sekä mikrorakennetta.